



PRÉFET  
DU PAS-DE-CALAIS

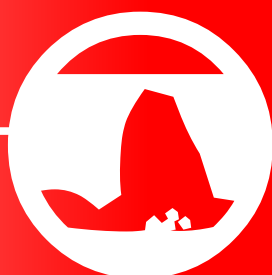
Liberté  
Égalité  
Fraternité

Direction Départementale des Territoires et de la Mer  
du Pas-de-Calais  
Service de l'Environnement / unité Gestion des Risques

## Élaboration du Plan de Prévention des Risques Mouvements de Terrain liés aux cavités souterraines sur les communes d'Achicourt, Arras et Beaurains

### · PHASE 2 : Évaluation des aléas

Livrables 4 à 8



	Référence	<i>Provisoire</i>	Version	3.0
	Date	<i>30 novembre 2020</i>	Édition	30/11/2020

ALP'GEORISQUES – Z.I. – 52, rue du Moirond – Bâtiment Magbel – 38420 DOMENE - FRANCE  
Tél. : 04-76-77-92-00 Fax : 04-76-77-55-90

sarl au capital de 18 300 € – Siret : 380 934 216 00025 - Code A.P.E. 7112B  
N° TVA Intracommunautaire : FR 70 380 934 216

Email : [contact@alpgeorisques.com](mailto:contact@alpgeorisques.com) – Site Internet : <http://www.alpgeorisques.com/>



### Identification du document

Projet	Élaboration du Plan de Prévention des Risques Mouvements de Terrain liés aux cavités souterraines sur les communes d'Achicourt, Arras et Beaurains		
Sous-titre	Livrables 4 à 8		
Document	Livable4_methode_qualification_aleas_v3.0.odt		
Référence	Provisoire		
Proposition n°	D1711112	Référence commande	<b>18-01-0062 du 05/03/2018</b>
Maître d'ouvrage	DDTM du Pas-de-Calais Service de l'Environnement / unité Gestion des Risques	100, Avenue Winston Churchill CS 10007 62022 ARRAS Cedex	
Maître d'œuvre ou AMO	CEREMA Nord-Picardie	2, Rue de Bruxelles, 59000 Lille	

### Modifications

Version	Date	Description	Auteur	Vérifié par
1.0	23/04/2019		DMB	EP/LL
1.3	18/06/2019	Prise en compte remarque COTEC 3	LL	EP/DMB
1.5	28/08/2019	Prise en compte remarque réunion téléphonique du 28/06/2019	LL	EP/DMB
2.0	17/10/2019	Modification volet pédagogique et occurrence effondrement généralisé	LL	EP/DMB
3.0	30/11/2020	Modification de la cartographie de la présomption	LL	DMB/MDF

### Diffusion

Chargé d'études	Didier MAZET-BRACHET	04 76 77 92 00	didier.mazetbrachet@alpgeorisques.com
Diffusion	Papier		
	Numérique	✓	

### Archivage

N° d'archivage (référence)	Provisoire
Titre	Élaboration du Plan de Prévention des Risques Mouvements de Terrain liés aux cavités souterraines sur les communes d'Achicourt, Arras et Beaurains
Département	62
Commune(s) concernée(s)	Achicourt, Arras, Beaurains
Cours d'eau concerné(s)	Scarpe et Crinchon
Région	Hauts-de-France
Thème	PPRN effondrement de cavités souterraines
Mots-clefs	PPRN effondrement fontis tassement Arras Achicourt Beaurains Pas-de-Calais



## TABLE DES MATIÈRES

<b>I. PRÉAMBULE.....</b>	<b>9</b>
<b>I.1. Objectifs de la mission.....</b>	<b>9</b>
<b>I.2. Organisation du projet.....</b>	<b>10</b>
<b>I.3. Objectifs de ce livrable.....</b>	<b>10</b>
<b>II. VOLET TECHNIQUE.....</b>	<b>11</b>
<b>II.1. Sources d'information.....</b>	<b>11</b>
<b>II.2. Limite de l'étude.....</b>	<b>11</b>
<b>II.3. Analyse de la cohérence et de la fiabilité de données.....</b>	<b>11</b>
<b>II.3.1. Besoins complémentaires et nécessaires à la poursuite de l'étude.....</b>	<b>12</b>
II.3.1.1. 48, rue Émile-Zola – Arras.....	12
II.3.1.2. 12, rue Clusius – Arras.....	12
II.3.1.3. 60, place des Héros – Arras.....	12
II.3.1.4. 9, place des Héros – Arras.....	13
II.3.1.5. Lycée Gambetta – Arras.....	13
II.3.1.6. 14, rue des Balances – Arras.....	13
II.3.1.7. Tribunal de Grande Instance – Arras.....	13
II.3.1.8. 43, Grand'Place – Arras.....	14
II.3.1.9. 16, Grand'Place – Arras.....	14
II.3.1.10. 17, Grand'Place – Arras.....	14
II.3.1.11. 12, Grand'Place – Arras.....	14
II.3.1.12. Place des Héros – Bove de l'office du tourisme - Arras.....	14
II.3.1.13. Cavité Portrush Sud – Arras.....	15
II.3.1.14. Cavité Leicester – Arras.....	15
II.3.1.15. 24 rue Baudimont – Arras.....	15
II.3.1.16. 50 place des Héros – Arras.....	15
<b>II.4. Méthode d'évaluation de l'aléa.....</b>	<b>16</b>
<b>II.4.1. Notion d'aléa.....</b>	<b>16</b>
<b>II.4.2. Documents de référence.....</b>	<b>17</b>
<b>II.4.3. Règles générales.....</b>	<b>17</b>
<b>II.4.4. Phénomènes historiques.....</b>	<b>18</b>
II.4.4.1. Effondrement généralisé – carrière souterraine – rue du Temple – Arras.....	18
II.4.4.2. Effondrement rue de la Housse – Bove – Arras.....	19
II.4.4.3. Effondrement croisement rue de Saint-Quentin et rue de la République – carrière souterraine – Arras.....	19
II.4.4.4. Rupture de pilier – carrière souterraine – Beaurains.....	20
II.4.4.5. Déstabilisation de bove – Arras.....	20
II.4.4.6. Rupture de bouchon de catiche – Arras.....	21
II.4.4.7. Fontis lié à un abri de tranchées – ouvrage militaire – Beaurains.....	22
II.4.4.8. Fontis – Arras.....	22
II.4.4.9. Rupture de bouchon de catiche – Arras.....	23
II.4.4.10. Débouillage de puits – Arras.....	23

II.4.4.11. Effondrement d'un transformateur – Beaurains.....	23
II.4.4.12. Débouillage de puits ou catiche – Arras.....	24
II.4.4.13. Fontis rue Raoul Follereau – Arras.....	24
<b>II.4.5. Notion de phénomène de référence.....</b>	<b>25</b>
<b>II.5. Critères de classification.....</b>	<b>25</b>
<b>II.5.1. Probabilité d'apparition des désordres en surface.....</b>	<b>25</b>
<b>II.5.2. Intensité du phénomène.....</b>	<b>26</b>
II.5.2.1. Affaissement.....	27
II.5.2.2. Effondrement localisé.....	27
II.5.2.3. Effondrement généralisé.....	29
II.5.2.4. Cas généraux.....	29
<b>II.5.3. Probabilité d'occurrence.....</b>	<b>29</b>
II.5.3.1. Probabilité d'occurrence pour les affaissements.....	29
II.5.3.2. Probabilité d'occurrence pour les effondrements localisés.....	31
II.5.3.3. Probabilité d'occurrence pour les effondrements généralisés.....	33
II.5.3.4. Probabilité d'occurrence en cas de « présomption de vides ».....	35
<b>II.5.4. Hiérarchisation de l'aléa lié à la présence de cavités souterraines.....</b>	<b>36</b>
<b>II.5.5. Les tranchées et ouvrages militaires annexes.....</b>	<b>37</b>
<b>II.6. Cartographie de l'aléa.....</b>	<b>38</b>
<b>II.6.1. Indices utilisés.....</b>	<b>38</b>
<b>II.6.2. Fiches cavités.....</b>	<b>38</b>
<b>II.6.3. Marge de sécurité.....</b>	<b>38</b>
II.6.3.1. Marge d'incertitude – précision de la donnée.....	38
II.6.3.2. Marge de recul – angle d'influence.....	39
<b>II.6.4. Principes de représentation.....</b>	<b>41</b>
II.6.4.1. Cas des cavités avec emprise, sans profondeur connue.....	41
II.6.4.2. Cas des cavités à placement ponctuel.....	41
II.6.4.3. Indices et sondages en l'absence de cavité connue.....	42
II.6.4.4. Incertitude liée à la continuité de la cavité.....	43
II.6.4.5. Zone des anciennes fortifications.....	43
<b>II.6.5. Synthèse des phénomènes attendus et des aléas.....</b>	<b>43</b>
II.6.5.1. Phénomènes attendus par type de cavité.....	43
II.6.5.2. Règles de cartographie de l'aléa.....	44
<b>III. VOLET PÉDAGOGIQUE.....</b>	<b>46</b>
<b>III.1. Rappel sur la notion de risque.....</b>	<b>46</b>
<b>III.2. Phénomènes en présence.....</b>	<b>46</b>
<b>III.3. Qualification de l'aléa.....</b>	<b>48</b>
<b>III.3.1. L'intensité du phénomène.....</b>	<b>48</b>
III.3.1.1. Intensité des affaissements.....	48
III.3.1.2. Effondrement localisé.....	49
III.3.1.3. Effondrement généralisé.....	49
<b>III.3.2. Probabilité d'occurrence.....</b>	<b>49</b>
III.3.2.1. Probabilité d'occurrence pour les affaissements.....	50
III.3.2.2. Probabilité d'occurrence pour les effondrements localisés.....	50
III.3.2.3. Probabilité d'occurrence pour les effondrements généralisés.....	51

III.3.2.4. <i>Probabilité d'occurrence en cas de « présomption de vides »</i> .....	52
<b>III.3.3. Hiérarchisation de l'aléa lié à la présence de cavités souterraines.....</b>	<b>52</b>
<b>III.3.4. Les tranchées et ouvrages militaires annexes.....</b>	<b>53</b>
<b>IV. CALENDRIER DU VOLET « ALÉAS » DU PPRN.....</b>	<b>55</b>
<b>V. BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>56</b>
<b>VI. GLOSSAIRE.....</b>	<b>57</b>
<b>VII. ANNEXE - FICHES DIAGNOSTICS DE CAVITÉ.....</b>	<b>58</b>

## I. Préambule

Ce rapport a été rédigé à la demande de DDTM du Pas-de-Calais, 100 Avenue Winston Churchill – CS 10007 - 62022 ARRAS Cedex, par la société ALP'GEORISQUES – Z.I. - 52, rue du Moirond 38420 DOMENE.

Le département du Pas-de-Calais est fortement impacté par le risque mouvements de terrain lié aux cavités souterraines d'origine naturelle ou issue de l'activité humaine (exploitations de craie, villages souterrains, sapes de guerre, etc.).

Le territoire de la communauté urbaine d'Arras (CUA), et plus particulièrement les communes d'Achicourt, Arras et Beaurains, très urbanisées, présentent une densité de cavités anthropiques importantes dans leur sous-sol.

Récemment, des désordres de types effondrements et affaissements ont été constatés dans des secteurs où aucune cavité n'a été recensée antérieurement. De plus, deux nouvelles carrières ont été découvertes, impactant deux projets.

Dans ce contexte, un Plan de Prévention des Risques Naturels (PPRN) « mouvements de terrains liés aux cavités souterraines » a été prescrit le 03 juin 2016 et un inventaire a été réalisé entre septembre 2017 et avril 2018 sur les communes d'Achicourt, Arras et Beaurains.

### I.1. Objectifs de la mission

L'élaboration d'un Plan de Prévention des Risques Naturels (PPRN) Mouvements de Terrain liés aux cavités souterraines est essentiel dans les territoires pour lesquels le risque est avéré ou pour lesquels il existe des enjeux importants.

Sur les communes d'Achicourt, Arras et Beaurains, la présence de cavité de grande ampleur dans des zones à forts enjeux nécessite la mise en place d'une réglementation de l'urbanisation du territoire, afin de mieux prendre en compte le risque dans les décisions et projets d'aménagement et de diminuer la vulnérabilité des personnes et des biens exposés à ce risque.

Les objectifs de ce PPRN seront de :

- délimiter et hiérarchiser les zones directement et indirectement exposées au risque ;
- établir des prescriptions, interdictions et recommandations relevant des règles d'urbanisme, de construction et d'utilisation des projets ;
- définir des mesures sur les biens et activités existants visant à réduire leur vulnérabilité ;
- prescrire aux particuliers et collectivités des mesures générales de prévention, de protection et de sauvegarde.

À cette fin, la mission vise à :

- **évaluer et caractériser l'aléa « mouvements de terrain liés aux cavités souterraines »** : l'objectif sera de délimiter et hiérarchiser, en plusieurs niveaux, les zones exposées ou potentiellement exposées à des phénomènes en fonction de leur intensité et leur probabilité d'occurrence prévisibles. L'évaluation des aléas transcrita, de manière objective, le potentiel de risque ou de nuisances que les cavités sont susceptibles d'engendrer, à terme, sur ces trois



communes ;

- **caractériser et évaluer les enjeux :**  
le but sera de recenser, en collaboration avec les collectivités territoriales, l'ensemble des enjeux existants au sein des territoires soumis à un ou plusieurs aléas et d'identifier les projets qui pourraient s'y développer, puis, d'évaluer la vulnérabilité de ces enjeux.
- **élaborer les documents réglementaires du PPRN :**
  - le zonage réglementaire qui délimitera des zones homogènes en termes de risque et y définira une réglementation spécifique (prescriptions, interdictions, recommandations) ;
  - le règlement définira de façon claire et opérationnelle les dispositions qui s'appliqueront aux projets nouveaux et aux biens et activités existants. Des mesures de prévention, protection et sauvegarde compléteront ces dispositions ;
  - la note de présentation expliquera et justifiera de façon précise et pédagogique les mesures réglementaires mises en place ;
  - le bilan de concertation reprenant les différents comptes-rendus des différentes réunions.
- **assister l'État lors des différentes phases de concertation.**

## **I.2. Organisation du projet**

Le projet comprend une tranche ferme :

Phase 1 : description des phénomènes et mécanismes d'instabilité

Phase 2 : évaluation des aléas

Phase 3 : appréciation des enjeux

et une tranche optionnelle :

Phase 4 : projet de PPRN – première version

Phase 5 : reprise du projet de PPRN suite à l'enquête publique

## **I.3. Objectifs de ce livrable**

Ce livrable a pour objectif de présenter :

- un volet technique comprenant
  - une présentation des données collectées fournies par le maître d'ouvrage pour la détermination des aléas ;
  - une analyse de la cohérence et de la fiabilité de ces données ainsi que des besoins complémentaires et nécessaires à la poursuite de l'étude ;
  - une présentation détaillée de la ou des méthodes employées pour déterminer l'aléa de référence, qualifier l'intensité et la probabilité d'occurrence des phénomènes, déterminer les classes d'aléa et réaliser sa cartographie ;
- un volet pédagogique et illustré reprenant de façon synthétique les méthodes retenues ;
- un planning de travail

## **II. Volet technique**

### **II.1. Sources d'information**

Le PPRN s'appuie sur les données issues de l'inventaire établi sur les territoires d'Achicourt, Arras et Beaurains. Ces données ont été recueillies par :

- exploitation bibliographique (monographies, thèses, études techniques, rapports de reconnaissances géologiques et géotechniques, etc.)
- recherche dans les archives civiles :
  - les archives départementales ;
  - les archives municipales ;
  - les autres archives civiles ;
- recherche dans les archives militaires :
  - les archives françaises ;
  - les archives britanniques ;
  - les archives allemandes ;
- exploitation de ressources Internet diverses ;
- exploitation des bases de données accessibles en ligne (BDcavités, Banque du sous-sol, etc.) ;
- enquête diffusée par les collectivités ;
- enquête de terrain ;
- enquête auprès de la population.

### **II.2. Limite de l'étude**

**Il est rappelé que n'ont pas été pris en considération :**

- les caves,
- les remblaiements des anciens fossés de fortification,
- les puits à eau reconnus comme tels,
- les cours d'eau souterrains canalisés,
- les réseaux d'assainissement connus.

**Dans la mesure du possible, les cavités accessibles ont été visitées, certaines dont on ne disposait pas de plan précis ont fait l'objet de relevés topographiques (voir II.3.1).**

### **II.3. Analyse de la cohérence et de la fiabilité de données**

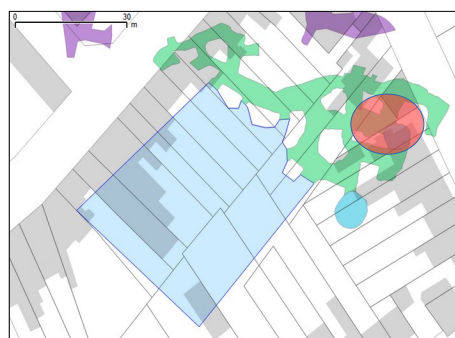
Les données collectées lors de la phase 1 ont été contrôlées et complétées tout au long de la phase 2, notamment par des visites de diagnostic de cavités, ce qui a conduit à la mise à jour du livrable 2 (cartographie informative des phénomènes naturels).

### **II.3.1. Besoins complémentaires et nécessaires à la poursuite de l'étude**

Au cours de la phase 2, la réalisation de fiches de diagnostic des cavités (voir § II.6.2) a abouti à l'identification de seize zones de carrières distinctes pour qu'il soit procédé à des levés topographiques. Sur ces cavités, les plans d'archives à disposition ont été jugés imprécis ou incomplets (zone non ou mal cartographiée, cote de profondeur absente). La technique retenue est une technique traditionnelle au théodolite-distancemètre visant à définir l'emprise des cavités, la position des piliers et les différents indices d'instabilité observables (cloche de fontis, remontée de voûte, fracturation, etc.). Les levés sont réalisés en présence d'un expert géologue guidant le topographe sur les éléments utiles à repérer.

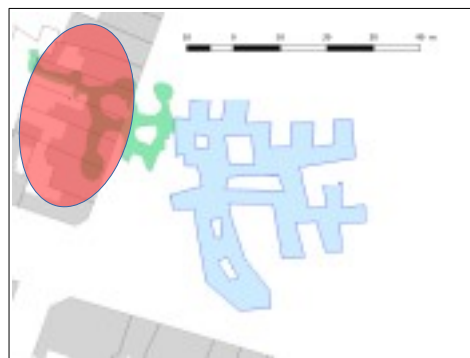
#### **II.3.1.1. 48, rue Émile-Zola – Arras**

- Emprise à lever en bleu et vert. (emprise verte levé au distancemètre DistoX) ;
- Carrière en chambres et piliers
- Descente par un puits équipé d'une échelle en aluminium (20 m) ;
- Secteur partiellement comblé sous parcelles 216, 217 et 575 (en rouge).



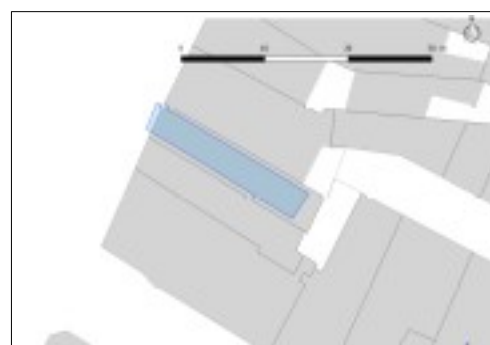
#### **II.3.1.2. 12, rue Clusius – Arras**

- Emprise à lever en bleu et vert ;
- Carrière en chambres et piliers ;
- Descente par un puits équipé d'une échelle ancienne (8 m) ;
- Secteur sous bâti muré (en rouge).



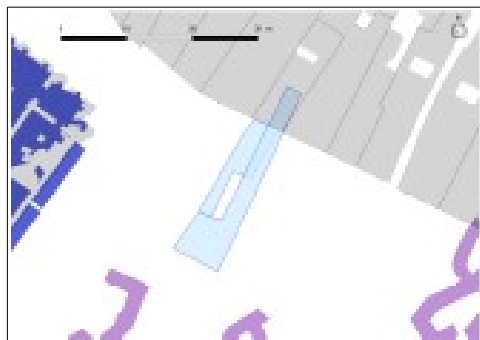
#### **II.3.1.3. 60, place des Héros – Arras**

- Emprise à lever en bleu ;
- Descente aménagée en escalier ;
- Cavité en salles superposées :
  - une cave voûtée sous bâti (pas de levé) ;
  - une salle voûtée sous chaussée (5 x 3 m) ;
  - une bove sous bâti 13 x 10 m ;
  - une bove sous bâti 27 x 4 m environ.



#### **II.3.1.4. 9, place des Héros – Arras**

- Emprise à lever en bleu ;
- Descente aménagée en escalier (1 cave) ;
- Galerie large, 1 pilier.
- Bove avec voûte maçonnée et craie pleine



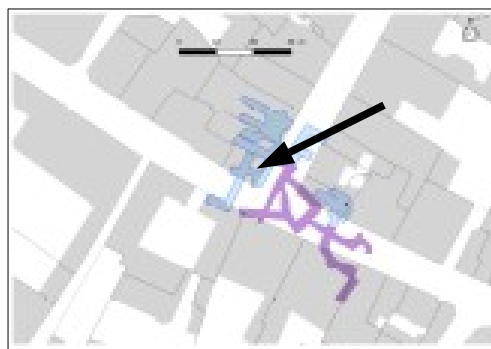
#### **II.3.1.5. Lycée Gambetta – Arras**

- Emprise à lever en bleu ciel et violet ;
- Descente aménagée en escalier (niveau de cave en bleue) ;
- Emprise rouge comblée ;
- Bove avec voûte maçonnée et craie pleine, hauteur faible ponctuellement (remblais).



#### **II.3.1.6. 14, rue des Balances – Arras**

- Emprise à lever en bleu et violet ;
- Descente aménagée en escalier (1 niveau de cave) ;
- Bove avec voûte maçonnée et craie pleine;
- Accès vers un second niveau par un trou dans une voûte (flèche noire).



#### **II.3.1.7. Tribunal de Grande Instance – Arras**

- Emprise à lever en bleu et violet ;
- Descente aménagée en escalier (1 niveau de cave) ;
- Secteur rouge muré ;
- Bove avec voûte maçonnée et craie pleine;
- Partiellement remblayé.



### **II.3.1.8. 43, Grand'Place – Arras**

- Emprise à lever en bleu clair et violet ;
- Deux niveaux de cavités.
- Bove avec voûte maçonnée et craie pleine



### **II.3.1.9. 16, Grand'Place – Arras**

- Emprise à lever en violet et bleu ;
- Bove avec voûte maçonnée et craie pleine
- Passage restreint dans certains secteurs.



### **II.3.1.10. 17, Grand'Place – Arras**

- 1 niveau de cave (marron) ;
- Emprise à lever en violet ;
- Bove avec voûte maçonnée et craie pleine



### **II.3.1.11. 12, Grand'Place – Arras**

- Emprise à lever en bleu ciel ;
- Accès aux réseaux violets remblayés, non accessibles ;
- Bove avec voûte maçonnée et craie pleine



### **II.3.1.12. Place des Héros – Bove de l'office du tourisme - Arras**

- Emprise à lever en violet en bleu clair ;
- Secteur rouge fermé non accessible ;
- Bove avec voûte maçonnée et craie pleine



### **II.3.1.13. Cavité Portrush Sud – Arras**

- Carrière en chambres et pilier
- Accessible par tampon non équipé (hauteur 4 m) et descenderie ;
- Emprise à lever en vert ;
- Accessibilité difficile (remblais et passage étroit).



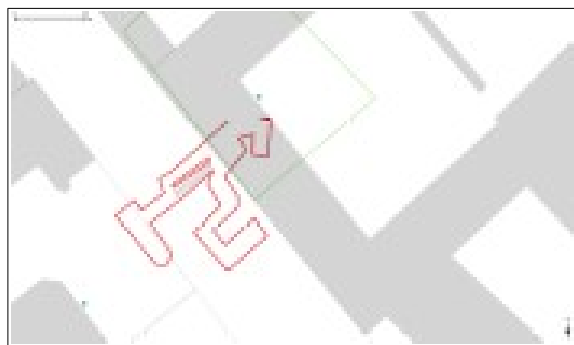
### **II.3.1.14. Cavité Leicester – Arras**

- Emprise à lever en rouge ;
- Regard sur chaussée équipé avec échelle aluminium de 9 m ;
- Galerie aboutissant sur une carrière en chambres et pilier partiellement remblayée (emprise indicative en rouge).



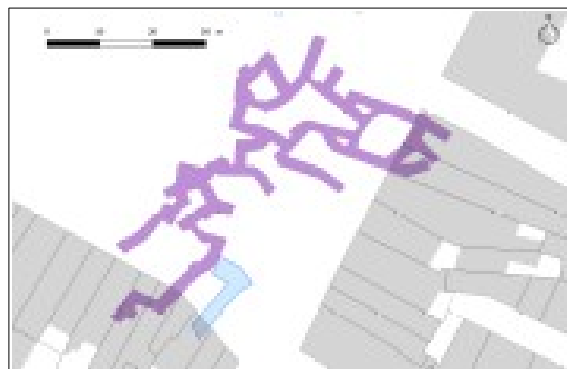
### **II.3.1.15. 24 rue Baudimont – Arras**

- Emprise à lever en rouge ;
- Regard sur trottoir ouvrant sur la cavité, accessible sans échelle ;
- Bove en majoritairement voûté, à faible profondeur.



### **II.3.1.16. 50 place des Héros – Arras**

- Emprise à lever en bleu et violet ;
- Descente d'escaliers (2 niveaux de cave) ;
- Bove avec voûte maçonnée et craie pleine



## **II.4. Méthode d'évaluation de l'aléa**

### **II.4.1. Notion d'aléa**

La notion d'aléa traduit la probabilité d'occurrence, en un point donné, d'un phénomène naturel de nature et d'intensité définie. Pour chacun des phénomènes rencontrés, différents niveaux d'aléas sont définis en fonction de l'intensité et la probabilité d'occurrence pour un ou plusieurs scénarios de référence. La carte des aléas a pour vocation de présenter un zonage des divers aléas observés ou identifiés à ce stade de l'étude, en fonction des recueils d'archives, des enquêtes réalisées auprès des collectivités et de la population et des reconnaissances de terrain. La précision du zonage est, au mieux, celle des fonds cartographiques utilisés comme support. Cette précision reste toutefois largement entachée par les incertitudes résiduelles induites par la qualité des documents consultés ou la justesse des témoignages.

Du fait de la grande variabilité des phénomènes naturels (affaissements, fontis, rupture de tête de puits, effondrement généralisé)<sup>1</sup>, et des nombreux paramètres qui interviennent dans leur déclenchement (qualité de la roche, densité de la fracturation, volume des vides, taux de défrètement, portée des vides, épaisseur de recouvrement, profondeur de la cavité, etc.), l'estimation de l'aléa dans une zone donnée est complexe. Bien que complexe, l'évaluation de l'aléa se veut la plus objective possible et repose sur la méthodologie exposée dans ce livrable ; elle fait appel à l'ensemble des informations recueillies au cours de l'étude, au contexte géologique, aux conditions naturelles locales et à l'appréciation du chargé d'études. Pour limiter l'aspect subjectif, la cartographie doit respecter des principes de caractérisation des différents aléas validés par les services de l'État.

L'élaboration de la carte des aléas impose de connaître plus ou moins finement, sur l'ensemble de la zone étudiée, l'intensité et la probabilité d'apparition des phénomènes naturels. Le PPRN n'a toutefois pas pour objectif de produire une qualification précise et exhaustive de l'aléa sur tout le territoire puisqu'il peut faire que le constat d'un état de connaissance (ou de la méconnaissance) à un moment donné. En matière de cavités souterraines, il est difficile de prétendre à l'exhaustivité de cette connaissance, car certaines cavités demeurent probablement inconnues à ce jour. De même, certaines cavités connues ne sont pas visitables du fait de l'obstruction des accès ou d'éboulements du ciel, ce qui introduit également une incertitude sur leur positionnement et leur stabilité. D'autres, au contraire, ont pu être visitées, voire relevées en topographie.

La cartographie de l'aléa constitue donc une traduction et une interprétation par l'expert chargé d'étude qui doit prendre en compte l'ensemble de ces paramètres.

---

1 On se reportera au livrable 1 pour la définition de ces phénomènes.

## II.4.2. Documents de référence

La qualification de l'aléa de mouvements de terrain liés aux cavités souterraines s'appuie sur le guide PPRN cavités souterraines disponible à l'adresse suivante : [side.developpement-durable.gouv.fr](http://side.developpement-durable.gouv.fr)



Figure II.1: Guide élaboré par la direction générale de la prévention des risques du ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie en 2012

## II.4.3. Règles générales

La carte des aléas s'efforce de déterminer l'emprise des terrains exposés aux mouvements de terrain, en mettant en avant des secteurs plus fortement concernés que d'autres. Elle subdivise ainsi les phénomènes naturels en plusieurs niveaux d'importance qui sont traduits en termes d'aléas : aléas très fort, fort, moyen, faible, négligeable ainsi qu'un indice de présence supposée de cavité. Les niveaux d'aléa répondent aux critères de classification définis pour chaque type de phénomène.

L'aléa est représenté en tenant compte des incertitudes liées à l'imprécision des informations recueillies (par exemple : cavité non localisable précisément, zone remblayée d'extension incertaine).

Il peut donc être très étendu sur certains secteurs lorsque l'information disponible n'est pas détaillée.



## II.4.4. Phénomènes historiques

L'identification du type de mouvements de terrain possibles sur un site donné nécessite de disposer de phénomènes de référence applicables à ce site. À conditions égales, un phénomène qui s'est déjà manifesté en un point donné peut se reproduire sur d'autres sites identiques, si les mêmes conditions sont réunies. Cette connaissance permet de s'approprier les mécanismes et l'ampleur possible de mouvements de terrain au niveau de la zone d'étude.

Partant des phénomènes de référence ainsi identifiés, l'aléa est ensuite qualifié en croisant l'intensité possible des phénomènes naturels avec leur probabilité d'occurrence.

Deux notions sont donc considérées pour sa qualification : **intensité** et **probabilité d'occurrence**.

Les témoignages historiques relatent peu de mouvements de terrain de grande ampleur apparus en surface. En revanche, les chroniques relatent un nombre significatif d'effondrements localisés, ruptures de tête de puits ou d'effondrements généralisés.

La liste ci-après dresse un état non exhaustif de désordres historiques observés :

### II.4.4.1. Effondrement généralisé – carrière souterraine – rue du Temple – Arras

Le 12 mai 1925, le service des mines de Béthune est avisé par les services de la Ville d'Arras de la présence d'importantes crevasses sur le bâti de la rue de Bapaume.

Cette rue étant la limite communale, les dégâts sont constatés sur le bâti des n°106, 108 et 114, sur la commune d'Achicourt : « des crevasses importantes affectent d'une façon spéciale les cours et dépendances desdits immeubles dans un cercle d'assez grand diamètre [...] Des excavations auraient déjà été comblées à cet endroit depuis la guerre ».

Les dégâts atteignent l'arrière des bâtis, en retrait de la rue. Les dégâts sont tels, que l'évacuation des habitants est recommandée sur les n°106 et 114.

Un second rapport du 14 mai 1925 apporte quelques précisions supplémentaires : « cet affaissement intéresse les propriétés [...] numérotées de 102 à 112, rue de Bapaume. L'affaissement se produit dans des terrains bâtis et non bâtis, en bordure de la route nationale et le point le plus rapproché de l'affaissement se trouve en environ 9 mètres de l'alignement. L'affaissement forme une sorte de cuvette circulaire d'environ 50 mètres de diamètre [...] ».

La localisation de cet effondrement précisé dans une lettre datée du 16 mai 1925 : « [...] dans le voisinage de la route nationale n°37, à la limite des communes d'Arras et d'Achicourt à une soixantaine de mètres du croisement de la Route Nationale et du chemin vicinal ordinaire n°9. ».

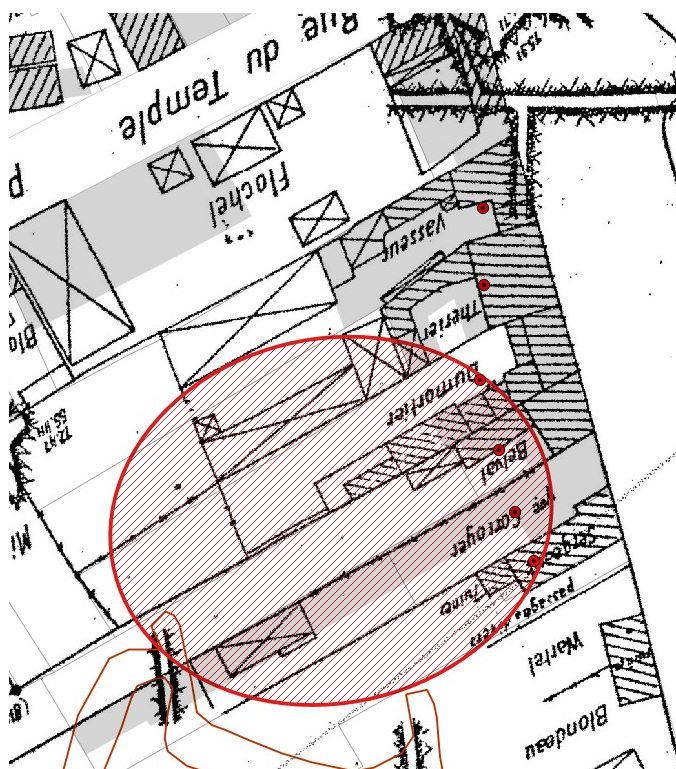


Figure II.2: Localisation estimée de l'effondrement de 1925 (zone rouge hachurée). Les pastilles rouges indiquent les propriétés impactées.

Il nous est apparu que la localisation de cet effondrement ne correspond plus à l'adresse postale actuelle (la rue de Bapaume étant devenu partiellement la rue Lobbedez). À l'aide des noms des propriétaires indiqués dans les différents courriers et du document XXX059, portant le nom des propriétaires sur le cadastre de 1930, il nous a été permis de localiser l'effondrement au niveau des actuels n°4 à 14 de la route de Bapaume actuelle.

L'importance du phénomène en surface et les dégâts associés laissent penser à l'effondrement généralisé d'une cavité partiellement remblayé ou de faible hauteur.

#### II.4.4.2. Effondrement rue de la Housse – Bove – Arras

Le 14 novembre 1955, un effondrement se produit dans la cave du n°14 de la rue de la Housse, puis la déstabilisation se propage avant de remonter en surface et de provoquer un large fontis (une dizaine de mètres de large) à la limite du bâti. D'importantes fissures apparaissent sur les façades du n°16 et 14, sous-cavées. Dans l'urgence, les façades sont étayées afin d'éviter leur ruine complète, mais devront cependant être rebâties sur de nouvelles fondations en béton. L'origine de la déstabilisation semble être la rupture de la voûte du niveau de craie (profondeur du plancher d'environ 10 m) par la surcharge du plancher de cave (entreposage de charbon). La rupture du plancher de cave entraînera alors la rupture des fondations du bâti, qui se trouvait alors suspendu au-dessus du vide. Cette situation aboutie est un report de charge sur un pilier de la carrière, dont la rupture entraînera l'ensemble des terrains à l'aplomb et l'apparition du fontis a la surface.

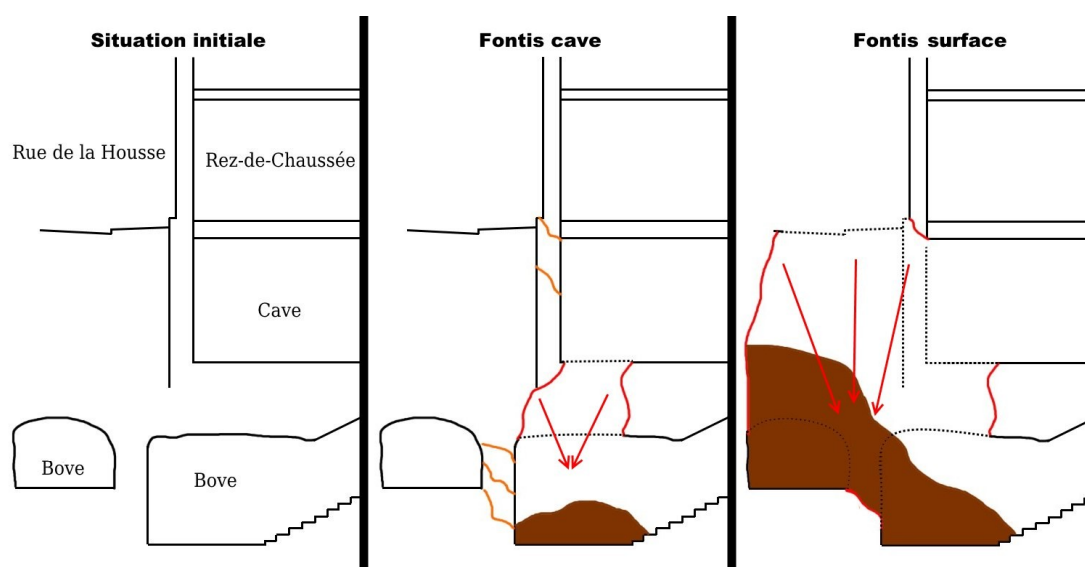


Figure II.3: Schéma de la déstabilisation du 14 novembre 1955 à partir du document ARR248. Les ruptures de voûtes sont symbolisées en rouge, les zones fragilisées par les reports de charge en orange. La zone occupée par les matériaux éboulés est symbolisée en marron.

#### II.4.4.3. Effondrement croisement rue de Saint-Quentin et rue de la République – carrière souterraine – Arras

Le 18 octobre 1938, l'éboulement d'une galerie à 14 m de profondeur dont les bois d'étalement se sont dégradés entraîne un affaissement de la chaussée et des trottoirs en surface, provoquant alors une rupture de canalisation souterraine d'adduction d'eau.

L'eau déversée dans la cavité a aggravé l'instabilité entraînant l'écroulement partiel d'un immeuble en surface (façade et une partie des deux pignons).

Aujourd'hui, le secteur concerné porte encore les stigmates de l'effondrement en profondeur. On notera dans ce secteur, comme dans beaucoup de cavités visitées, que des remblais contenus par des murets de pierres sèches masquent la partie basse des parois de la cavité.

Ceux-ci peuvent également cacher des vides partiellement remblayés, ou non, qui peuvent modifier les contours de la cavité, le taux de défrètement et la portée entre piliers.

L'effondrement partiel d'un muret dans cette zone, a mis à jour une zone vide d'environ 4 m<sup>2</sup> en bordure de la galerie.

On citera également le cas de la cavité Thomson, où le déblaiement d'un remblai a mis à jour une chambre circulaire supplémentaire de 10 m de diamètre.

#### **II.4.4.4. Rupture de pilier – carrière souterraine – Beaurains**

Le 11 juin 1987, au matin, un fontis d'une dizaine de mètres de largeur s'ouvre sur la chaussée en limite du bâti au 21, rue Victor Hugo à Beaurains, entraînant le mur de la cave de l'habitation et faisant porter une partie de la façade dans le vide. La cavité sous-jacente n'était a priori pas connue, mais elle montrait des signes d'occupation lors de la Seconde Guerre mondiale.

Il s'agit d'une cavité en piliers tournés, longiligne (50 x 10 m), dont la forme est approximativement celle de la parcelle. Le bâti étant partiellement déstabilisé, le fontis est comblé dans la journée avec des matériaux divers (brique, ballast, etc.).



Figure II.4: Fontis à l'avant du 21 rue Victor Hugo à Beaurains. Source : BRGM (BEA25).

Néanmoins, le scénario de rupture naturel d'un pilier est conforté par les observations de la SOCOTEC le jour même et puis par le Service de l'Inspection des Carrières Souterraines du département du Nord lors de l'inspection du 9 octobre 1987.

Celui-ci notera par ailleurs que le rapport de charge sur les piliers avoisinants compromet la stabilité du restant de la cavité, car l'ensemble des piliers malgré leur section satisfaisante, sont fissurés.

#### **II.4.4.5. Déstabilisation de bove – Arras**

Le 28 juillet 1993, une fuite d'eau d'un robinet dans la cave du 13, rue Baudimont permet la découverte fortuite d'une cavité sous la voirie. Auparavant, seul un niveau de cave était connu.

La déstabilisation (affaissement) du sol de ce niveau de cave, dans lequel un robinet fuit depuis plusieurs jours, permet de découvrir qu'un second niveau est présent et remblayé.

C'est l'effondrement du troisième niveau, non remblayé et dans lequel plusieurs infiltrations se sont produites (perte du réseau unitaire et robinet), qui provoque l'affaissement partiel du sol de la première cave et l'effondrement du mur mitoyen avec l'immeuble sis au n°11.

L'accès par cet immeuble permet de découvrir deux niveaux de cavités maçonnées sous la voirie, parallèle aux façades et approximativement au niveau du 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> niveau de cave. Une fuite est détectée au niveau de la canalisation du réseau d'égout unitaire installée dans le niveau de la voûte la plus proche de la surface.

Celle-ci a désagrégé la voûte du niveau inférieur, entraînant son effondrement et la déstabilisation dans

le troisième niveau de cave non connu du n°13.

Cette déstabilisation permet de découvrir à temps la présence des deux niveaux sous la voirie, dont la rupture complète aurait pu avoir de plus grave conséquence.

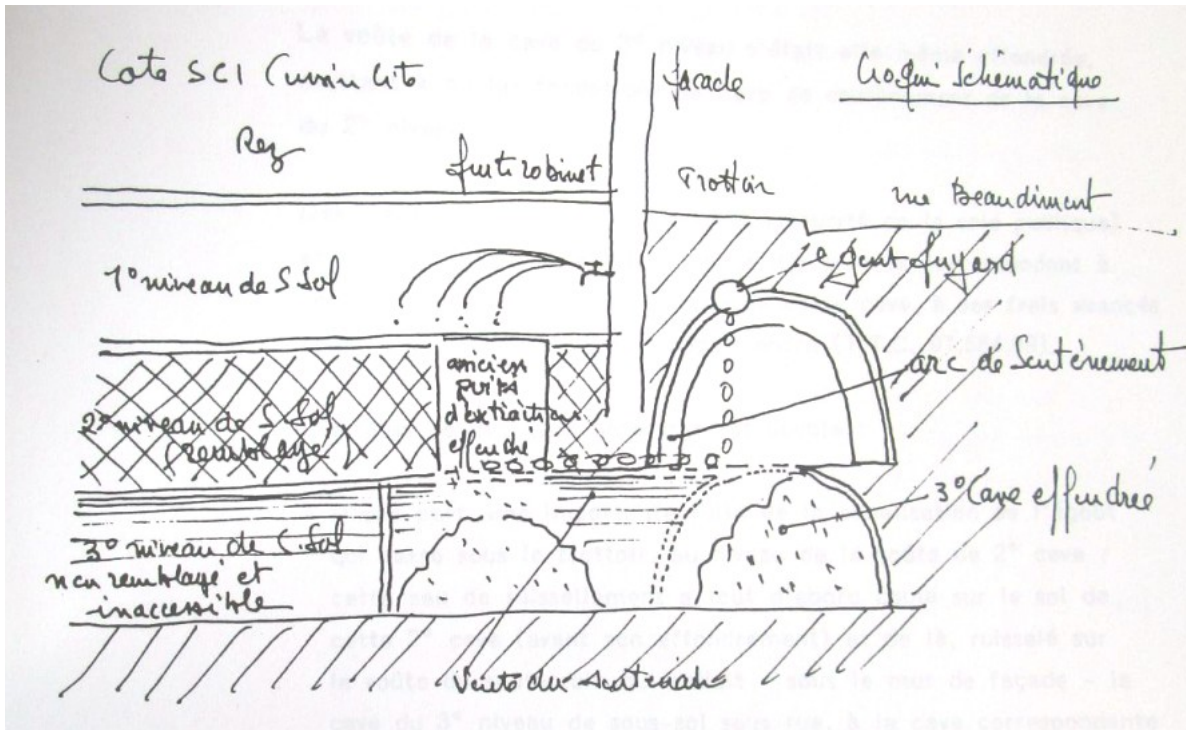


Figure II.5: Schéma de la déstabilisation du 13 rue Baudimont à Arras issu du document ARR235

#### II.4.4.6. Rupture de bouchon de catiche – Arras

En décembre 1996, un effondrement se produit dans le jardin du 108, avenue Fernand-Lobbedez. L'ouverture en surface est ovoïde 1,5 x 3 m, la profondeur est de 9 m au sommet du cône d'éboulis à 11 m à sa base.

La largeur de la cavité est d'environ 5,5 à 6,5 m de largeur avec deux départs de galerie effondrés vers le sud et le nord. Le volume estimé de la cavité (130 m<sup>3</sup>) et les proportions laissent à penser qu'il s'agit de l'effondrement de la voûte d'une catiche.

Lors de l'étude, un effondrement similaire a été identifié dans les années 1990 dans une parcelle voisine au numéro 104. L'existence d'une connexion entre ces deux cavités est assez probable dans le sens où une galerie se dirige vers cet effondrement plus ancien.

Celui-ci a été traité par le recouvrement d'une dalle de béton.

On ne peut exclure une connexion vers la cavité Jean-Jaurès qui se trouve 70 m au sud.

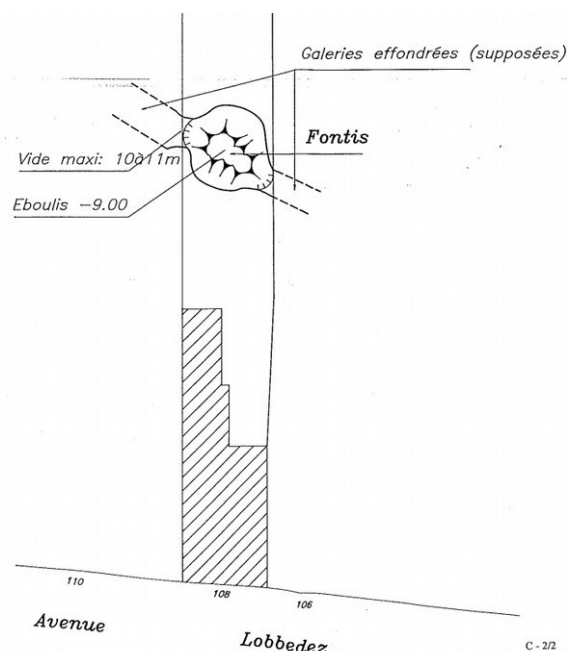


Figure II.6: Extrait du document ARR274 localisant l'effondrement.

#### II.4.4.7. Fontis lié à un abri de tranchées – ouvrage militaire – Beaurains

Le vendredi 14 mars 2008, un fontis de 2,5 m de diamètre et de 4 m de profondeur apparaît dans le jardin d'une habitation rue Docteur-Schweitzer à Beaurains.

L'équipe du Groupe de Reconnaissance et d'Intervention en Milieux Perilleux (GRIMP), envoyé sur place, découvre deux salles de 36 m<sup>3</sup> relié par un boyau, avec une épaisseur de recouvrement évalué à 5 m.

La position du fontis correspond à l'emplacement d'un abri de tranchée allemand porté sur une carte de tranchées de 1918 (document référencé XXX45). La découverte d'un obus allemand tend à confirmer qu'il s'agit bien d'une cavité utilisée pendant la première guerre mondiale, sans doute comme abris ou dépôt.



Figure II.7: Fontis rue Docteur-Schweitzer à Beaurains. Source: GRIMP (BEA14)

#### II.4.4.8. Fontis – Arras



Figure II.8: Fontis le long de la chaussée du barreau sud. Source: Mairie d'Arras (ARR296)

En juillet 2005, plusieurs mouvements de terrain sont apparus sur la commune d'Arras. On retiendra les événements suivants :

- au niveau du **barreau sud** (liaison rue de Cambrai et rue Bocquet-Flochel), un important fontis apparaît en bordure de la chaussée. Son diamètre est estimé d'après les photographies à environ 2 à 3 m, pour une profondeur équivalente. Ce secteur se trouve à proximité d'un secteur de sapes Alliés connues et peut prévenir d'un effondrement partiel de l'ouvrage (profondeur inconnue).

Il peut également s'agir d'un effondrement lié à des ouvrages annexes de tranchées (abris) ou à des carrières souterraines non connues. Aucun diagnostic n'ayant été réalisé à notre connaissance, il n'est pas possible de conclure de l'origine du fontis avec certitude.

- au niveau de la **Chambre Régionale des Comptes** sis 14, rue du Marché-au-Filé à Arras, un fontis de faible diamètre apparaît dans la cours de l'établissement.

Des investigations plus poussées (géoradar et sondages) permettront de mettre à jour un niveau de cavité vers -7 m dont la remontée de voûte d'abord dans la craie puis dans des matériaux meuble (remblais) est à l'origine du fontis en surface.

Il s'agit d'un niveau de bove, courant dans le centre-ville, dont l'accès vraisemblablement remblayé empêche de fait de surveiller la dégradation de la cavité et de prévenir les désordres en surface.

#### II.4.4.9. Rupture de bouchon de catiche – Arras

En juin 2012, lors de la réhabilitation d'une allée d'une propriété privée au 48 rue Émile-Zola, un effondrement est constaté en bordure du bâti.

Le GRIMP effectue une exploration de l'effondrement.

Celui-ci donne sur une large carrière qui était inconnue auparavant. Elle ne montre pas de signe d'utilisation lors de la Première Guerre mondiale et aucune connexion vers des cavités connues n'a été découverte.

Le diagnostic réalisé dans la suite de cette découverte se limitera à réaliser un levé de la cavité dans la zone proche de l'effondrement et se trouvant sous le bâti.

C'est pourquoi dans le cadre de la présente étude, un relevé complémentaire de l'ensemble de la cavité a été réalisé (voir II.3.1.1). La catiche effondrée a nécessité de lourds travaux de remblaiement afin de permettre le retour des habitants dans le bâti sis à l'aplomb.



Figure II.9: Rupture de bouchon de catiche rue Émile Zola. Source: GRIMP (ARR285)

#### II.4.4.10. Débouillage de puits – Arras

Le 20 novembre 2015, un fontis est apparu dans le jardin au 62, rue Gustave-Colin.

Le fontis de 2,6 m de profondeur est circulaire, ce qui peut laisser penser qu'il s'agit du débouillage d'un puits mal remblayé.

La même année, des sondages réalisés à 25 m à l'est du fontis ont révélé la présence d'une carrière souterraine sous l'emprise du projet de la rue de Beaumarchais à une vingtaine de mètres de profondeur.



Figure II.10: Débouillage de puits rue Gustave Colin. Source: DDTM62 (ARR220)

#### II.4.4.11. Effondrement d'un transformateur – Beaurains



Figure II.11: Effondrement route de Tilloy. Source: DDTM62

Jeudi 25 janvier 2018, un effondrement route de Thillooy entraîne un transformateur électrique dans un fontis.

Le sinistre étant encore récent, on ne peut conclure sur les raisons de l'effondrement.

On peut signaler qu'un niveau de carrière a été découvert à proximité immédiate à une profondeur de 6 à 9 m. Le secteur est également concerné par des tranchées de la Première Guerre mondiale.

Enfin de nombreux fontis sont signalés dans ce secteur (11 dans un rayon de 200 m).

#### II.4.4.12. Débouillage de puits ou catiche – Arras

Le 04 mai 2018, un fontis se déclare au passage d'un camion benne sur le site de l'école supérieure du professorat et de l'éducation (ESPE) rue du Temple.

Il mesure environ 50 cm d'ouverture et le vide visible n'a été ni mesuré, ni diagnostiqué.

Au vu des éléments connus, il peut aussi bien s'agir de la rupture d'une voûte de catiche que d'un débouillage d'un puits. La plus proche cavité connue se trouve à 100 m sur le site de l'université d'Artois.

#### II.4.4.13. Fontis rue Raoul Follereau – Arras

En mars 2017, un fontis apparaît au niveau des dernières places de parking de l'IRST le long de la rue Raoul-Follereau.

Le fontis est d'ampleur limitée, au centre d'un affaissement plus large. Des travaux de nature indéterminée sont effectués afin de combler le fontis et de permettre à nouveau le stationnement des voitures.

Cependant l'affaissement s'est réactivé, comme cela a pu être constaté en février 2019. Ce secteur est proche de la zone de front de 14-18, avec de nombreuses tranchées et galeries connues dans ce secteur.

L'effondrement d'un ouvrage militaire annexe aux tranchées (abris, dépôts, etc.) peut légitimement être envisagé. La plus proche carrière connue est à 350 m sur le site de l'université d'Artois.

Faute d'éléments de diagnostic plus poussé (sondages), il n'est pas possible de se prononcer sur l'origine de la déstabilisation.

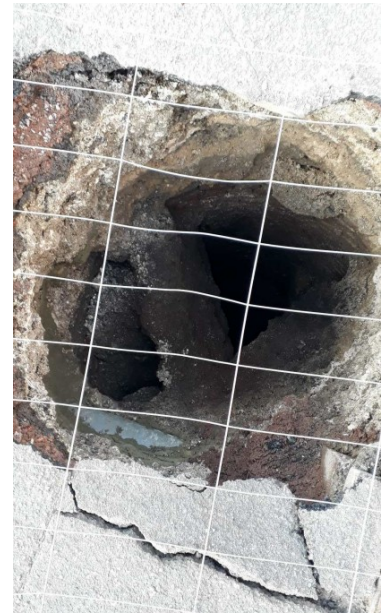


Figure II.12: Débouillage de puits sur le site de l'ESPE d'Arras. Source: Mairie d'Arras (ARR364)



^ Situation en mars 2017, avant travaux de comblement

Situation en février 2019, après réactivation de l'affaissement >

Figure II.13: Affaissement au niveau du parking de l'IRSTS. Source: mairie d'Arras et AGR.

## **II.4.5. Notion de phénomène de référence**

La pratique et les textes en vigueur précisent que les aléas doivent être définis en retenant comme référence les plus forts phénomènes historiques connus si leur période de retour est supérieure à un siècle ou sinon un phénomène théorique centennal.

La notion de période de retour est difficilement applicable aux mouvements de terrain : ces phénomènes sont soit instantanés (rupture du toit d'une cavité, chutes de blocs, fontis), soit lents (affaissement). La fréquence d'apparition de ces phénomènes dans une zone donnée – et donc la période de retour – est difficile à estimer en l'absence d'observations longues et exhaustives.

Les aléas de mouvements de terrain ont donc été déterminés à partir de scénarios de référence qui correspondent à des phénomènes prévisibles, considérés comme très probables (probabilité tendant vers 1) sur une période d'une centaine d'années. L'aléa traduit donc les effets probables du scénario de référence, c'est-à-dire l'intensité prévisible des phénomènes intégrés au scénario.

**Les aléas cartographiés correspondent ainsi à l'intensité des manifestations prévisibles des phénomènes naturels pour les scénarios de référence retenus.**

Le phénomène de référence pour l'effondrement localisé (souvent dénommé fontis) est un effondrement partiel de la cavité lié à différent type de rupture :

- ruine d'un pilier, type événement de 1987, qui est le plus important phénomène historique connu (effondrement d'une dizaine de mètres de large),
- chute de toit, type événement de 2008,
- débouillage de puits, type événement de 2015,
- rupture de bouchon de catiche, type événement de 2012.

Le phénomène de référence pour l'effondrement généralisé est un effondrement complet d'un secteur de la cavité du type de l'événement de 1925. Si aucun autre phénomène de cette ampleur n'a été constaté, la réalisation de visites de terrain a permis de constater que ce phénomène reste possible sur le secteur d'étude.

## **II.5. Critères de classification**

### **II.5.1. Probabilité d'apparition des désordres en surface**

Lors de la chute des matériaux dans les cavités (du toit, des piliers, etc.), les matériaux éboulés occupent un plus grand volume que la roche en place ; c'est le foisonnement. Ainsi, en fonction de la profondeur et du volume de vide, il est possible que des déstabilisations ne remontent pas à la surface, les matériaux éboulés comblant entièrement le vide. **Le coefficient de foisonnement retenu est de 1,3 soit une augmentation du volume des matériaux de 30 %.**

Néanmoins cette valeur ne peut être directement utilisée pour calculer la probabilité d'apparition d'un fontis ou d'un affaissement en surface, car de nombreux autres paramètres sont à considérer tels que la résistance de la roche, l'épaisseur des matériaux de recouvrement, le diamètre de la remontée (aussi appelé cheminée), la stratigraphie fine, le pendage, la fracturation, etc. De même l'étalement des matériaux éboulés en fond de cavité peut intervenir pour beaucoup, selon comment il s'effectue et de la place dont il dispose (volume de vide, présence d'eau pouvant modifier l'angle du cône d'ébouillis, vide interstitiel des matériaux éboulés, etc.).



Le phénomène d'auto-comblement apparaît dès que le volume foisonné provenant de la cheminée égale la somme des volumes de la galerie et de la cheminée. Celui-ci ne peut être estimé exactement en tout point au vu des hauteurs de vides très variables dans les cavités et sans connaissance fine des recouvrements et de leur qualité.

Sur l'ensemble de la zone d'étude, les nombreux sondages réalisés dans la région montrent un faible recouvrement du substratum par des terrains meubles (1 à 2 m).

Il a été choisi de se rapporter à la **règle de Vachat**, élaborée empiriquement par l'observation de fontis dans les carrières de calcaire du bassin parisien, afin d'évaluer la probabilité d'apparition d'un fontis en surface. Selon cette règle, l'épaisseur du recouvrement  $H$  doit être supérieure ou égale à 15 fois la hauteur de la galerie  $w$  pour écarter le risque de remontée de fontis en surface. Cette règle ne permet pas de calculer le diamètre du fontis attendu en surface. Elle ne peut pas être appliquée strictement, notamment dans le cas où la nature et l'épaisseur des terrains de couverture sont défavorables.

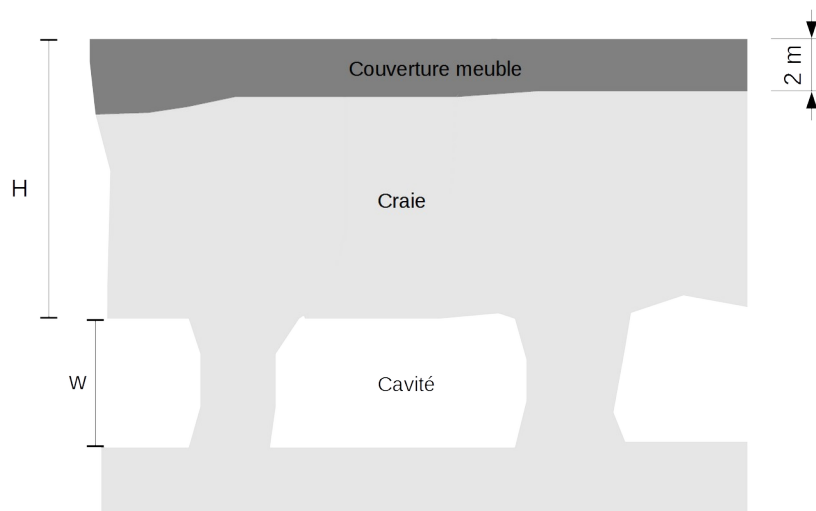


Figure II.14: Paramètre géométrique de la règle de Vachat.

**En conséquence, les phénomènes d'affaissement sont considérés pour des cavités présentant un rapport  $H/w$  supérieur à 15. Les cavités présentant un rapport inférieur sont plutôt sujettes aux effondrements localisés.**

### **II.5.2. Intensité du phénomène**

L'intensité d'un phénomène traduit l'ampleur de l'impact subit par le secteur affecté par le phénomène. Elle peut également être estimée en tenant compte des difficultés et du coût des mesures qu'il conviendrait d'engager pour prévenir la survenance du phénomène ou réparer les dommages causés par le phénomène.

La répercussion d'un phénomène sur son environnement sera plus ou moins forte selon le contexte initial de la zone où prend naissance le phénomène (caractéristiques géométriques et géotechniques du site). Par exemple, l'intensité de l'effondrement d'une cavité haute sous plafond sera beaucoup plus importante que celle d'une cavité de faible hauteur. Dans cet exemple, le volume de vide à compenser croît avec la hauteur de voûte, donc les répercussions en surface du mouvement de terrain sont plus conséquentes. D'autres facteurs sont également à prendre en compte comme le volume de vide, la profondeur de la cavité ou encore l'épaisseur et la nature du recouvrement.

L'intensité d'un phénomène peut donc être estimée en jugeant le contexte et les caractéristiques des vides pouvant conduire à des mouvements de terrain.

### II.5.2.1. Affaissement

L'impact d'un affaissement à la surface du terrain se traduit par la formation d'une dépression plus ou moins prononcée, avec une mise en pente du sol en bordure du phénomène et la manifestation d'un mouvement vertical général (mise en pente plus significative en bordure de cuvette et amplitude des déformations verticales plus forte au centre). Les dégâts aux biens sont donc liés aux déformations différentielles verticales subies et aux efforts d'extension et de compression qui s'exercent aux points de courbure entraînant la mise en pente du terrain :

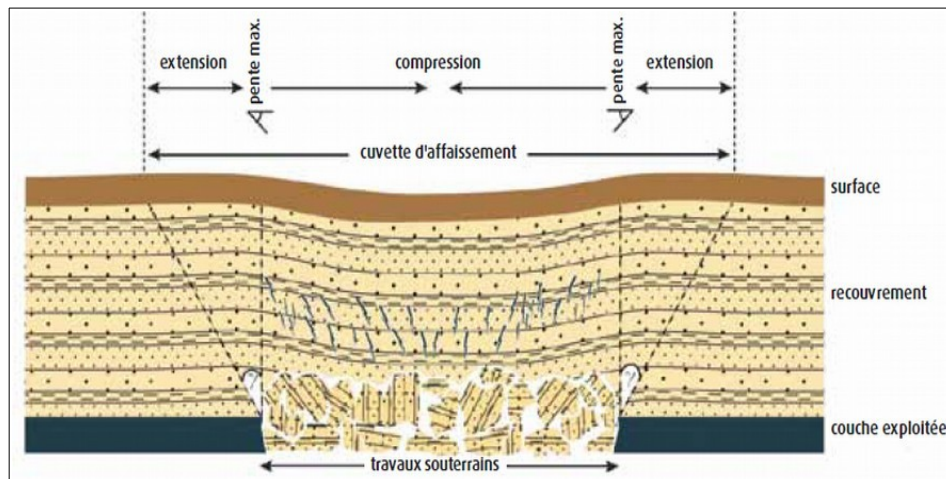


Figure II.15: schéma d'un mécanisme d'affaissement (Guide PPRN, 2012).

L'ampleur des déformations de terrain dépend de plusieurs facteurs. Les principaux sont la hauteur de vide (cavité de très faible hauteur sous plafond ou vide résiduel non remblayé), l'épaisseur du recouvrement de la cavité (estimation de la compensation du vide par le foisonnement des matériaux), l'étendue de la cavité, la méthode d'exploitation, le pendage stratigraphique, la présence de failles, etc. Plus ces facteurs apparaissent défavorablement, plus la mise en pente du terrain peut être prononcée avec une intensité résultante qui s'élève. Dans le cas d'affaissement lié à des cavités de faible profondeur dont l'étendue est limitée, la valeur de la mise en pente est difficile à apprécier. Il a été choisi de définir un niveau d'intensité unique, de classe « Très limitée ».

Classe d'intensité	Description
Très limitée	Effondrements auto-remblayés à proximité immédiate de la surface (« flache » de profondeur centimétrique à décimétrique)

La classe d'intensité « Très limitée » est traduite par un indice « a » dans la notation de l'aléa.

### II.5.2.2. Effondrement localisé

Un effondrement localisé traduit la formation d'un fontis dont le diamètre peut varier de quelques décimètres à plusieurs mètres, voire plus. Le phénomène entraîne donc un trou en surface, avec un décrochement de terrain plus ou moins redressé (bordure en forme évasée liée au talutage naturel du terrain). Sa profondeur peut varier en fonction de la réception et du calage naturel des matériaux au fond de la cavité (stabilisation et talutage naturel des matériaux) et de la compensation du vide par le foisonnement sous la voûte qui a cédé.

Les dégâts dus à un effondrement localisé sont principalement liés aux graves défauts de portance qui peuvent survenir au droit du phénomène (par exemple, si le phénomène se manifeste sous des fondations). Leur gravité augmentera proportionnellement à l'ampleur de l'effondrement. Ainsi, un bâti touché par un fontis très localisé peut subir des dommages équivalents à un tassement différentiel alors qu'un fontis plus important (plusieurs mètres de diamètre) peut infliger des dégâts plus conséquents aux structures du bâti, voire une ruine de la construction.

L'intensité des effondrements localisés est définie selon l'importance des phénomènes. Elle est hiérarchisée en trois classes exprimées en fonction du diamètre des effondrements.

Tableau II.1: Classe intensité « effondrement localisé »

Classe d'intensité	Diamètre de l'effondrement (en mètres)
Limitée	$\varnothing < 5 \text{ m}$
Modérée	$5 \text{ m} < \varnothing < 10 \text{ m}$
Élevée	$\varnothing > 10 \text{ m}$

L'intensité de l'effondrement localisé est établie en rapport avec le diamètre du fontis en surface **Df**. D'après le retour d'expérience de l'INERIS (Didier, 2010), le diamètre de cheminée de fontis **D** s'établit généralement entre 0,4 et 0,5 fois la largeur de la galerie **a** où il se forme. Il est également dépendant de l'épaisseur de la couverture meuble en surface. Dans le cas présent, une valeur moyenne **h** de 2 m de matériaux meubles de surface est retenue (voir II.5.1). Sachant que ces terrains présentent des qualités géomécaniques médiocres, avec une pente d'équilibre  $\alpha$  (talutage naturel) qui a été évaluée à 30°. Ceci aboutit à la prise en compte d'un recul **L** de 1,15 m de part et d'autre des parois de la cheminée. En conséquence :

- un fontis de diamètre <5 m en surface se produit quand la distance **a** est inférieure 5,4 m
- un fontis de diamètre compris entre 5 et 10 m en surface se produit quand la distance **a** est comprise entre 5,4 et 15,2 m
- un fontis de diamètre > 10 m en surface se produit quand la distance **a** est supérieur à 15,2 m.

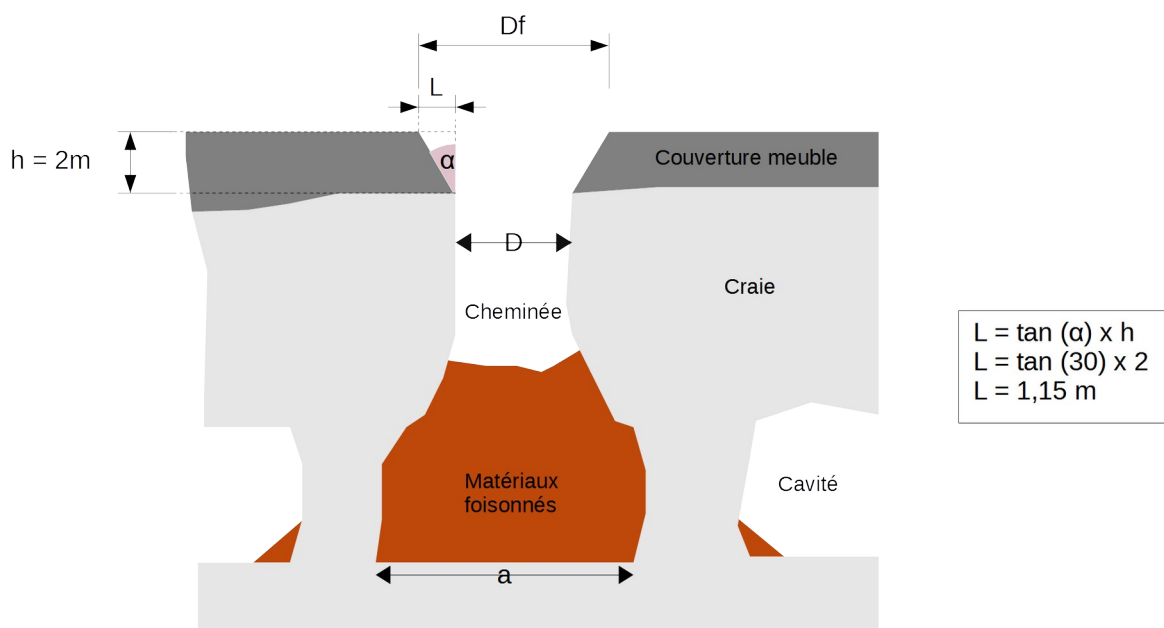


Figure II.16: Largeur de fontis attendu en fonction de la portée entre piliers

Ces valeurs sont données à titre indicatif. Des situations particulières peuvent se présenter, notamment dans le cas de remontée de fontis selon des fissurations verticales qui peuvent faire dépasser le rapport largeur de galerie **a** / diamètre de fontis **D**.

Dans un scénario de ruine d'un pilier, cette formule peut être également appliquée, en prenant comme distance  $a$  la distance séparant les piliers situés de part et d'autre du pilier ruiné.

### II.5.2.3. Effondrement généralisé

Un effondrement généralisé (ou en masse) traduit un phénomène d'étendue importante, voire très importante, pouvant concerner l'intégralité d'une cavité. Il est lié à l'état géotechnique général des cavités, dont en particulier les taux de défrusement, la qualité des points d'appui (piliers, bordures des cavités), les caractéristiques du recouvrement (épaisseur, nature des matériaux), la résistance de la roche (valeur connue ou ordre de grandeur estimé), la fissuration, etc. Le phénomène peut très fortement chahuter le sol en provoquant d'importants décrochements à la surface du terrain (plusieurs mètres), jusqu'à conduire à une situation chaotique.

De tels effondrements peuvent entraîner la ruine des biens situés en surface. Les dégâts peuvent donc être très dommageables et les parades pour s'en prémunir demandent la mise en œuvre de moyens lourds (par exemple : comblement intégral de cavité).

L'intensité d'un effondrement généralisé est donc systématiquement considérée « Élevée ».

Tableau II.2: Classe intensité « effondrements généralisés »

Classe d'intensité	Description
Élevée	Effondrement en masse de la surface

### II.5.2.4. Cas généraux

En l'absence de donnée suffisante (absence de levés, cavité de type inconnu, superficie non estimée, etc.), l'intensité forte est retenue pour les cavités à l'intérieur des remparts (cavité attendue de type bove), l'intensité élevée à l'extérieur (cavité attendue de type chambres et piliers).

## II.5.3. Probabilité d'occurrence

Les mouvements de terrain sont des phénomènes non périodiques. Ils sont quasiment imprévisibles dans le temps et ne correspondent pas à une période de retour. Ils évoluent généralement lentement, sur de longues périodes, et peuvent connaître de brusques accélérations. Dans le domaine des cavités souterraines, cette lente évolution correspond au vieillissement et à la dégradation naturelle inéluctable des cavités. Elle se manifeste de façon plus ou moins prononcée en fonction des caractéristiques géotechniques des édifices. Les structures supportant ces derniers se fragilisent ainsi petit à petit, avec en phase ultime des phénomènes de rupture mécanique localisée ou généralisée selon les cas.

Dans le cadre des mouvements de terrain, la notion de probabilité d'occurrence est ramenée à la prédisposition d'un site à un type de rupture. L'expertise géotechnique des cavités et l'analyse des secteurs concernés par la présence avérée ou supposée de vides permettent d'établir un bilan sur la prédisposition d'un site à la rupture. Les critères de jugement intervenant dans ce bilan sont essentiellement géotechniques (fissuration, taux de défrusement, état des piliers, cloches de fontis, présence d'eau et sensibilité des matériaux à l'eau, etc.).

### II.5.3.1. Probabilité d'occurrence pour les affaissements

La prédisposition d'un site au phénomène d'affaissement est généralement liée à la nature de la cavité, aux conditions de remblaiement des parties comblées, au contexte encaissant.

- nature des cavités (hauteur de voûte, forme des cavités) ;

- profondeur des cavités et nature du recouvrement) ;
- nature de la roche et résistance connue ou estimable par observation ;
- comblement par bourrage de remblais et estimation des vides résiduels au niveau de la voûte ;
- état géotechnique connu du site ;
- présence d'eau ;
- etc.

L'appréciation de ces facteurs, sur la base des investigations réalisées préalablement (étude de terrain, enquêtes et exploitation de la bibliographique), permet d'estimer à dire d'expert la prédisposition d'un site aux affaissements de terrain.

Le tableau suivant présente les critères retenus pour la qualification de la prédisposition aux affaissements. **Dès qu'un facteur (hors épaisseur de recouvrement) est dépassé, une probabilité d'occurrence supérieure doit être considérée.**

Pour rappel, ces critères s'appliquent sur les cavités présentant un rapport **H/w** supérieur à 15 (voir II.5.1).

Tableau II.3: Probabilité d'occurrence « affaissements »

Probabilité d'occurrence	Critères
<b>Faible</b>	<p><b>Épaisseur de recouvrement supérieure à 10 mètres.</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pas de fissuration mécanique des piliers.</li> <li>• Fissures géologiques rares et peu développées tolérées au niveau des piliers, sous réserve qu'elles ne mettent pas en jeu la stabilité de la cavité.</li> <li>• Fissures mécaniques rares et peu développées tolérées au niveau de la voûte, sous réserve qu'elles ne mettent pas en jeu la stabilité de la cavité.</li> <li>• Fissures géologiques peu nombreuses tolérées au toit, sous réserve qu'elles ne mettent pas en jeu la stabilité de la cavité.</li> <li>• Décollement de voûte localisé toléré (faible superficie impactée) sans autre signe environnant de fragilité.</li> <li>• Chute de toit localisée et peu conséquente tolérée dans la tranche de recouvrement d'épaisseur supérieure à 10 mètres.</li> <li>• Karst peu développé.</li> <li>• Portées entre appuis inférieures à 5 mètres.</li> <li>• Taux de défrètement inférieur à 60 %</li> <li>• Pas de présence d'eau.</li> <li>• Cavité totalement remblayée depuis la surface avec certitude de la suppression des vides (par exemple voûte effondrée puis comblement jusqu'au niveau du terrain naturel).</li> </ul> <p>À la prise en compte de ces critères s'ajoute l'appréciation géotechnique générale que porte l'expertise sur la cavité.</p>
<b>Moyenne</b>	<p><b>Épaisseur de recouvrement comprise entre 5 mètres et 10 mètres.</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pas de fissuration mécanique ou de fissuration géologique majeure des piliers.</li> <li>• Karst peu développé au niveau de la voûte et pas de karst au niveau des piliers.</li> <li>• Fissures géologiques et mécaniques rares tolérées au niveau de la voûte, sous réserve qu'elles ne mettent pas en jeu la stabilité de la cavité. Les Fissures géologiques sont plus facilement tolérées au toit selon le contexte de la cavité, notamment du type de piliers. Pour les fissures mécaniques, il est préférable de chercher à identifier s'il s'agit de fissures contemporaines de l'exploitation (libération de contraintes au moment de l'extraction de la roche ou fissures post-exploitation</li> </ul>

	<p>liées à des mouvements de terrain).</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Cloche de fontis d'origine ancienne et d'apparence stabilisée.</li> <li>• Décollement de voûte localisé toléré (faible superficie impactée) sans autre signe environnant de fragilité.</li> <li>• Chute de toit localisée et peu conséquente tolérée dans la tranche de recouvrement d'épaisseur supérieure à 5 mètres.</li> <li>• Portées entre appuis comprises entre 5 mètres et 8 mètres.</li> <li>• Taux de défruitement compris entre 60 % et 75 %</li> <li>• Présence d'eau temporaire tel que rejet pluvial.</li> <li>• Entrée de cavité remblayée (partie débouchant à ciel ouvert).</li> </ul> <p>À la prise en compte de ces critères s'ajoute l'appréciation géotechnique générale que porte l'expertise sur la cavité.</p>
<p><b>Forte</b></p>	<p style="text-align: center;"><b>Épaisseur de recouvrement inférieure à 5 mètres.</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fissures fréquentes du toit avec forte proportion de fissures mécaniques.</li> <li>• Fissuration mécanique des piliers, notamment fissuration subverticale.</li> <li>• Fort élancement des piliers (aspect visuel du rapport hauteur / section des piliers).</li> <li>• Présence de conduits karstiques importants recoupant les piliers (forte réduction de la résistance mécanique des piliers).</li> <li>• Décollement de voûte très significatif (masse décollée de la voûte avec indices de déplacements centimétriques).</li> <li>• Cloche de fontis d'apparence active.</li> <li>• Zone d'effondrement historique.</li> <li>• Fissures géologiques fréquentes et/ou développées.</li> <li>• Zone de chutes de toit dans la tranche de recouvrement inférieure à 5 mètres, ou effondrement plus conséquent quelle que soit l'épaisseur du recouvrement.</li> <li>• Portées entre appuis supérieures à 8 mètres.</li> <li>• Taux de défruitement supérieure à 75 %.</li> <li>• Présence d'eau permanente.</li> <li>• Cavité remblayée par bourrage sans information précise sur l'agencement des remblais.</li> </ul> <p>À la prise en compte de ces critères s'ajoute l'appréciation géotechnique générale que porte l'expertise sur la cavité.</p>

### **II.5.3.2. Probabilité d'occurrence pour les effondrements localisés**

La prédisposition d'un site aux effondrements localisés est plutôt liée à la présence de secteurs localement dégradés dans les cavités. Plusieurs types d'effondrements localisés peuvent se produire : chutes de toit, rupture d'un pilier, débouillage d'orifices (karst ou puits). La prédisposition aux effondrements localisés est donc estimée en notant toutes anomalies géotechniques pouvant fragiliser les édifices :

- présence de cloche de fontis ;
- fissuration de la voûte ;
- nature des terrains de recouvrement ;
- épaisseur du recouvrement ;
- fissuration des piliers ;
- estimation de la répartition des charges entre les piliers, résistance apparente des piliers ;
- présence d'eau et sensibilité de la roche à l'eau ;

- portées entre appuis (longueur de voûte non soutenue) et taux de défruitement ;
- présence de conduits karstiques au niveau des voûtes ;
- nature des matériaux de remblaiement des puits et stabilisation de ces derniers ;
- etc ;

L'appréciation de ces facteurs sur la base de l'inspection géotechnique permet d'estimer à dire d'expert la prédisposition d'un site aux effondrements localisés.

Dans le cas des effondrements localisés, les taux de défruitement donnent une indication supplémentaire sur les espaces de vides potentiellement présents entre les piliers. Ils sont donc exploités en complément des portées entre appuis mesurables sur les plans. Plus une surface de vide est importante entre des piliers, plus la voûte d'une cavité est théoriquement fragile, car elle a tendance à se décompresser plus vite et elle est exposée à des efforts de flexion plus conséquents. La valeur des taux de défruitement permet donc de juger, à l'échelle d'une cavité, la plus ou moins forte prédisposition d'un site à l'apparition de cloches de fontis, qui peuvent ensuite progresser jusqu'à la surface, ou à l'effondrement localisé de la voûte par rupture soudaine.

Le tableau suivant présente les critères retenus pour la qualification de la prédisposition aux effondrements localisés. **Dès qu'un facteur (hors épaisseur de recouvrement) est dépassé, une probabilité d'occurrence supérieure doit être considérée.**

Pour rappel, ces critères s'appliquent sur les cavités présentant un rapport **H/w** inférieur à 15 (voir II.5.1).

Tableau II.4: Probabilité d'occurrence « effondrements localisés »

Probabilité d'occurrence	Critères
<b>Faible</b>	<p style="text-align: center;"><b>Épaisseur de recouvrement supérieure à 10 mètres.</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pas de fissuration mécanique des piliers.</li> <li>• Fissures géologiques rares et peu développées tolérées au niveau des piliers, sous réserve qu'elles ne mettent pas en jeu la stabilité de la cavité.</li> <li>• Fissures mécaniques rares et peu développées tolérées au niveau de la voûte, sous réserve qu'elles ne mettent pas en jeu la stabilité de la cavité.</li> <li>• Fissures géologiques peu nombreuses tolérées au toit, sous réserve qu'elles ne mettent pas en jeu la stabilité de la cavité.</li> <li>• Décollement de voûte localisé toléré (faible superficie impactée) sans autre signe environnant de fragilité.</li> <li>• Chute de toit localisée et peu conséquente tolérée dans la tranche de recouvrement d'épaisseur supérieure à 10 mètres.</li> <li>• Karst peu développé.</li> <li>• Portées entre appuis inférieures à 5 mètres.</li> <li>• Taux de défruitement inférieur à 60 %</li> <li>• Pas de présence d'eau.</li> </ul> <p>À la prise en compte de ces critères s'ajoute l'appréciation géotechnique générale que porte l'expertise sur la cavité.</p>

<p><b>Moyenne</b></p>	<p style="text-align: center;"><b>Épaisseur de recouvrement comprise entre 5 mètres et 10 mètres.</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pas de fissuration mécanique ou de fissuration géologique majeure des piliers.</li> <li>• Karst peu développé au niveau de la voûte et pas de karst au niveau des piliers.</li> <li>• Fissures géologiques et mécaniques rares tolérées au niveau de la voûte, sous réserve qu'elles ne mettent pas en jeu la stabilité de la cavité. Les Fissures géologiques sont plus facilement tolérées au toit selon le contexte de la cavité, notamment du type de piliers. Pour les fissures mécaniques, il est préférable de chercher à identifier s'il s'agit de fissures contemporaines de l'exploitation (libération de contraintes au moment de l'extraction de la roche ou fissures post-exploitation liées à des mouvements de terrain).</li> <li>• Cloche de fontis d'origine ancienne et d'apparence stabilisée.</li> <li>• Décollement de voûte localisé toléré (faible superficie impactée) sans autre signe environnant de fragilité.</li> <li>• Chute de toit localisée et peu conséquente tolérée dans la tranche de recouvrement d'épaisseur supérieure à 5 mètres.</li> <li>• Portées entre appuis comprises entre 5 mètres et 8 mètres.</li> <li>• Taux de défrètement compris entre 60 % et 75 %</li> <li>• Présence d'eau temporaire tel que rejet pluvial.</li> </ul> <p>À la prise en compte de ces critères s'ajoute l'appréciation géotechnique générale que porte l'expertise sur la cavité.</p>
<p><b>Forte</b></p>	<p style="text-align: center;"><b>Épaisseur de recouvrement inférieure à 5 mètres.</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fissures fréquentes du toit avec forte proportion de fissures mécaniques.</li> <li>• Fissuration mécanique des piliers, notamment fissuration subverticale.</li> <li>• Fort élancement des piliers (aspect visuel du rapport hauteur / section des piliers).</li> <li>• Présence de conduits karstiques importants recoupant les piliers (forte réduction de la résistance mécanique des piliers).</li> <li>• Décollement de voûte très significatif (masse décollée de la voûte avec indices de déplacements centimétriques).</li> <li>• Cloche de fontis d'apparence active.</li> <li>• Zone d'effondrement historique.</li> <li>• Fissures géologiques fréquentes et/ou développées.</li> <li>• Zone de chutes de toit dans la tranche de recouvrement inférieure à 5 mètres, ou effondrement plus conséquent quelle que soit l'épaisseur du recouvrement.</li> <li>• Portées entre appuis supérieures à 8 mètres.</li> <li>• Taux de défrètement supérieure à 75 %.</li> <li>• Présence d'eau permanente.</li> </ul> <p>À la prise en compte de ces critères s'ajoute l'appréciation géotechnique générale que porte l'expertise sur la cavité.</p>

### **II.5.3.3. Probabilité d'occurrence pour les effondrements généralisés**

Les effondrements généralisés peuvent concerner essentiellement les anciennes carrières étendues, **exploitées par la technique des chambres et piliers**. La prédisposition du phénomène répond en partie aux mêmes critères que pour les effondrements localisés (état des piliers), avec un facteur supplémentaire d'importance qui concerne les contraintes s'exerçant sur un grand nombre de piliers. Ces derniers fortement sollicités par le poids de la voûte à supporter peuvent avoir atteint leur limite de résistance, voire pour certains déjà présenter un état de ruine avancé. Des ruptures sont alors possibles (ruptures simultanées de plusieurs piliers ou rupture individuelle de piliers entraînant par « effet de



château de cartes » la chute d'autres éléments porteurs.

Les critères « taux de défrètement » et « fissuration des piliers » sont particulièrement décisifs dans l'estimation de la prédisposition d'une cavité à un effondrement généralisé :

- Les taux de défrètement peuvent intervenir pour beaucoup dans l'exposition d'une cavité souterraine aux phénomènes d'effondrements généralisés, notamment en présence de matériaux peu résistants à la compression et selon les épaisseurs de recouvrement. Ainsi, plus l'épaisseur de recouvrement est importante, plus le poids de la voûte supportée par les piliers est conséquent. Les contraintes mécaniques subies par les piliers augmentent donc avec l'épaisseur de recouvrement des cavités. En cas de section insuffisante, la résistance des piliers s'opposant au poids de voûte peut ainsi être dépassée, ce qui peut conduire à l'écrasement des piliers, puis à une rupture généralisée.

Le taux de défrètement est le ratio entre la surface des vides et la surface de l'exploitation. Plus sa valeur est élevée, plus la surface portante restante (piliers) est faible. Sachant qu'à taux de défrètement égal, l'aptitude portante des piliers en place diminue au fur et à mesure que l'épaisseur de recouvrement augmente, il existe donc une relation entre la prédisposition à l'effondrement massif d'une cavité et son taux de défrètement.

- Le diagnostic géotechnique des cavités permet de constater l'état général de fissuration des piliers et d'identifier si un mouvement de terrain généralisé est possible par rupture simultanée, ou par enchaînement, de plusieurs d'entre eux. Il est ainsi tenu compte de l'état mécanique individuel de chaque pilier, mais également de l'état général de stabilité des cavités, en cherchant à identifier si des accidents mécaniques de plus grande extension sont présents. Cela conduit à considérer l'état général des piliers par secteurs de cavité.

Ces points demandent donc d'adapter les critères « taux de défrètement », « recouvrement » et « fissuration des piliers » pour l'évaluation des prédispositions aux effondrements généralisés.

Deux cas se présentent :

1. Cas des cavités en bon état apparent, sans signe de déstabilisation :
  - pas de présence d'eau temporaire ou permanente
  - pas de pilier présentant de fissuration importante
2. Cas des cavités dégradés :
  - présence d'eau temporaire ou permanente
  - pilier ou groupe de piliers présentant une fissuration importante

Tableau II.5: Probabilité d'occurrence « effondrements généralisés » – cas 1

Recouvrement	< 10 m	10 à 20 m	> 20 m
< 50 %			Faible
50-55 %		Faible	Faible
55-60 %		Faible	Faible
60-65 %	Faible	Faible	Moyenne
65-70 %	Faible	Moyenne	Moyenne
70-75 %	Faible	Moyenne	Moyenne
75-80 %	Moyenne	Moyenne	Forte
80-85 %	Moyenne	Forte	Forte
> 85 %	Forte	Forte	Forte

Tableau II.6: Probabilité d'occurrence « effondrements généralisés » – cas 2

Recouvrement Taux de défruitement	< 10 m	10 à 20 m	> 20 m
< 50 %	Faible	Faible	Faible
50-55 %	Faible	Faible	Moyenne
55-60 %	Faible	Moyenne	Moyenne
60-65 %	Faible	Moyenne	Forte
65-70 %	Moyenne	Forte	Forte
70-75 %	Moyenne	Forte	Forte
75-80 %	Forte	Forte	Forte
80-85 %	Forte	Forte	Forte
> 85 %	Forte	Forte	Forte

À cela ont été ajoutées dans les critères de probabilité d'occurrence « forte » les **cavités inaccessibles à l'extérieur des remparts**, mais de présence certaine, afin d'aller dans le sens de la sécurité.

#### II.5.3.4. Probabilité d'occurrence en cas de « présomption de vides »

Certaines cavités signalées sont inaccessibles car condamnées et peu d'informations sont disponibles à leur sujet. Dans ce cas, seuls des témoignages ou des plans très approximatifs anciens permettent de se faire une idée sur la présence possible de vide et sur leur extension, en cherchant parallèlement d'autres indices de confirmation.

Des indices de terrain seuls peuvent également traduire la présence possible de cavités oubliées (par exemple dépressions de terrain, vestiges d'installation de surface, etc.), sans qu'aucun témoignage ne le confirme.

Dans ces cas de figure, la présence de cavité ne peut donc pas être affirmée avec certitude, ni localisée, même lorsque des témoignages apportent quelques précisions. Seule une présomption de vides peut être mise en avant, avec à la clé la détermination d'une probabilité d'occurrence de présomption de vide (ou prédisposition à la rupture). Il convient toutefois de pondérer cette dernière en intégrant à la démarche les lacunes d'information. Cette nuance permet de tenir compte des incertitudes et des imprécisions apparaissant sur de tels sites, sans minimiser les règles sécuritaires devant encadrer de tels cas de figure.

La présomption de vide est graduée en trois niveaux : improbable, probable et très probable. Elle est directement corrélée à la probabilité d'occurrence selon le tableau ci-dessous :

Présomption	Probabilité d'occurrence
Improbable	Faible
Probable	Moyenne
Très probable, voire certaine	Forte
Une cavité de présence certaine n'est pas une présomption de vide.	-

Tableau II.7: Probabilité d'occurrence « présomption de vides » retenue

## II.5.4. Hiérarchisation de l'aléa lié à la présence de cavités souterraines

Le niveau d'aléa est évalué en croisant l'intensité établie du phénomène avec sa probabilité d'occurrence (ou prédisposition à la rupture). Le niveau d'aléa croît proportionnellement à l'élévation de ces deux facteurs, comme schématisé par le tableau II.8.

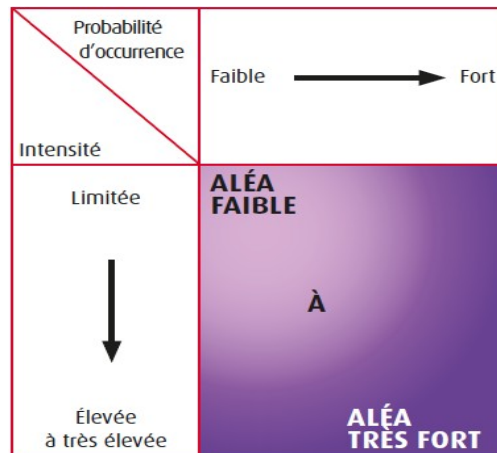


Tableau II.8: Échelle de hiérarchisation de l'aléa lié à la présence de cavités souterraines selon le guide méthodologique

L'étude menée à l'échelle du territoire (prospections de terrain, visites de cavités, enquêtes de terrain, exploitation d'archives, exploitation de la bibliographie, études techniques existantes) permet d'évaluer de façon la plus objective possible les facteurs d'intensité et de probabilité d'occurrence. Cette analyse globale permet une meilleure connaissance des cavités présentes sur du territoire, avec toutefois certaines zones de doutes qui ne peuvent pas être levées. L'aléa mouvement de terrain lié à la présence de cavités souterraines a donc été cartographié en intégrant cet ensemble d'informations et en s'adaptant aux doutes subsistants. Sa hiérarchisation s'est appuyée sur la grille de traduction suivante.

Tableau II.9: Hiérarchisation de l'aléa lié à la présence de cavités souterraines

Probabilité d'occurrence	Faible	Moyenne	Forte
Intensité			
Très limitée	Faible (F1a)	Faible (F1a)	Moyen (F2a)
Limitée	Faible (F1)	Moyen (F2)	Moyen (F2)
Modérée	Moyen (F2)	Moyen (F2)	Fort (F3)
Élevée	Moyen (F2)	Fort (F3)	Très fort (F4)

Un indice « a » est utilisé pour cartographier les zones liées à une intensité très limitée (phénomène d'affaissement). L'aléa lié à la présomption de vide est cartographié à l'aide d'un indice « p ».

À cette grille de hiérarchisation de l'aléa, nous ajouterons le cas de figure des cavités comblées par injection de coulis de ciment dans le respect des règles de l'art (présence de sondage de contrôle notamment). L'aléa est ramené à un niveau négligeable au niveau des secteurs ainsi traités puisque le vide est supprimé à l'aide d'un matériau « plein » de substitution. Un niveau d'aléa négligeable est donc considéré dans ce cas de figure. Cet affichage permet de mémoriser les travaux réalisés et de tenir informer les propriétaires sur leur existence.

Tableau II.10: Aléa lié aux secteurs comblés par injection

Catégorie	Aléa
<b>Cavité comblée par injection de coulis de ciment avec clavage de finition et forage de contrôle</b>	Négligeable (F0)

Toutefois, suivant le contexte local, un secteur d'une cavité comblée pourra ne pas être cartographié en F0, si l'aléa d'autre cavité vient les recouvrir du fait de l'application de la marge d'insécurité (II.6.3). Les secteurs comblés peuvent être représentés, sans que l'aléa puisse être considéré comme négligeable.

### II.5.5. Les tranchées et ouvrages militaires annexes

Les tranchées de surface et les cratères d'explosion des sapes ont été remblayés avec des matériaux divers à la sortie de la guerre. Des tassements peuvent y survenir du fait de l'évolution des matériaux et notamment des matières putrescibles.

Les abris de tranchée souterrains (type dugout), sont peu représentés sur les cartes de tranchées, vraisemblablement du fait de leur grand nombre qui peut nuire à la lisibilité de la carte. Si certains abris sont connus grâce à des documents mentionnant leurs coordonnées, ils sont loin d'être exhaustifs. Dans leur modèle standard, ces abris rectangulaires (2 x 10 m, une hauteur de 2 m à une profondeur de 7 à 8 m) se trouvent dans une bande de 10 m le long des tranchées. Des abris plus grands peuvent exister. Afin de tenir compte de ces incertitudes, une bande d'aléas de 20 m de largeur est présente le long des tranchées cartographiées, augmentée de la marge d'incertitude. Dans la zone des remparts d'Arras, cette bande n'est pas présente (hors données BRGM), de nombreux abris (caves, boves) étant possibles hors des tranchées.

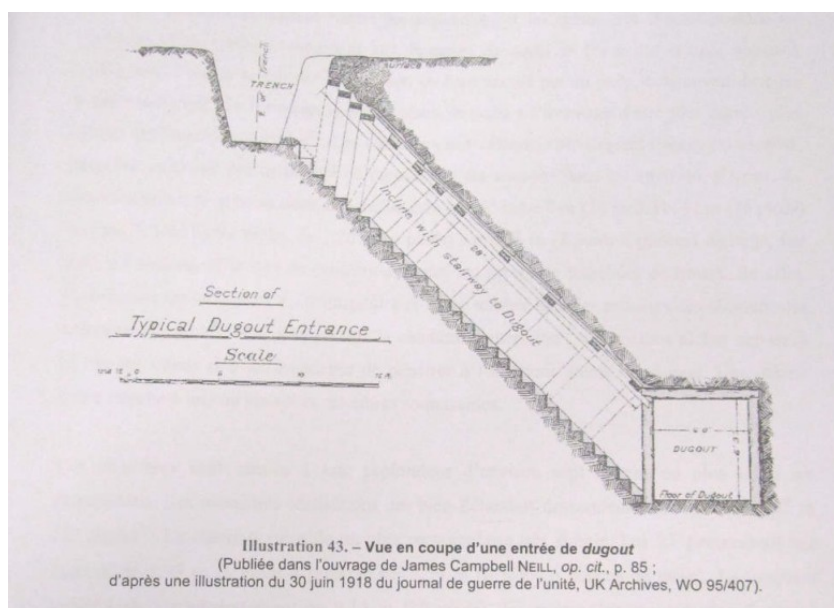


Figure II.17: Vue en coup d'une entrée de dugout. Source: A.Byledbal

Afin de tenir compte de ces incertitudes, une bande d'aléas de 20 m de largeur est présente le long des tranchées cartographiées, augmentée de la marge d'incertitude. Dans la zone des remparts d'Arras, cette bande n'est pas présente (hors données BRGM), de nombreux abris (caves, boves) étant possibles hors des tranchées.

Afin de tenir compte des phénomènes liés aux tassements et effondrement lié à ces ouvrages, un aléa spécifique de tranchées est cartographié.

Tableau II.11: Aléa lié aux secteurs de tranchées

Catégorie	Aléa
<b>Zone de tranchées avec cavités annexes vraisemblable</b>	Faible (T1)

## **II.6. Cartographie de l'aléa**

### **II.6.1. Indices utilisés**

Outre la couleur, les zones d'aléa d'effondrement seront repérées par un indice alphanumérique :

- Négligeable : F0
- Faible : F1
- Moyen : F2
- Fort : F3
- Très fort : F4

**Un indice « a » est utilisé pour cartographier les zones liées à une intensité très limitée. L'aléa lié à la présomption de vide est cartographié à l'aide d'un indice « p ».**

L'aléa de tranchées est cartographié avec un indice unique : T1.

Exemple : F3p (aléa fort lié à la présomption de vide)

### **II.6.2. Fiches cavités**

Afin de déterminer l'aléa, des visites de cavités ont été réalisées. Ces visites ont permis d'établir des fiches de diagnostic de niveau 1, au sens du guide IFSTTAR 2016 : *Le diagnostic de stabilité des carrières souterraines abandonnées*. Son objectif est de qualifier la stabilité de la carrière par la visite du site, ainsi que la cartographie des vides et des désordres observés. Y est également attachée la qualification de l'aléa par cavité ou secteur de cavité. Elles sont présentées en annexe du présent rapport (§ VII).

### **II.6.3. Marge de sécurité**

La cartographie de l'aléa représente l'emprise des cavités connues, ainsi qu'une marge de sécurité autour de ces cavités. Cette marge est le résultat de la prise en compte de l'erreur de placement de cavité et la prise en compte de désordres potentiels en dehors de la stricte emprise de la cavité.

#### **II.6.3.1. Marge d'incertitude – précision de la donnée**

Les données (nature et type) recueillies dans le cadre de l'élaboration de la carte d'aléas sont très hétéroclites. Les emprises et la localisation des cavités sont portées sur des plans d'âge et de source variable, voire inconnue.

Différents éléments sont source d'incertitude :

- pour les données purement descriptives (rapport, correspondance, etc.), les rédacteurs des documents font le plus souvent référence à des numéros de rue et au nom des personnes occupants ou propriétaires des bâtiments. Ces éléments sont aujourd'hui très difficiles à retrouver et demandent des recherches importantes (anciens cadastres, recoupement entre différents documents, état civil, etc.).
- pour les emprises de cavités, certains documents n'affichent que peu ou pas du tout de point de repère fiable (cadastre, bâti, etc.), et ne possèdent pas toujours une échelle et peuvent être très schématique. Pour certains plans, le repérage quasi inexistant ou lié à une urbanisation totalement modifiée a créé une importante incertitude de positionnement.

Une précision de positionnement a été attribuée à l'ensemble des éléments cartographiés selon la grille II.12 issue de la nomenclature BRGM. L'imprécision est traduite par une enveloppe élargie dans le périmètre de l'aléa, aboutissant à une **marge de sécurité**.

code	Définition	Zone d'aléa
très précis	Précision <5m	Augmenté entre 0 et 2,5 m
précis	Précision entre 5 et 25m	Augmenté entre 2,5 et 13 m
approché	Précision entre 25 et 250m	Augmenté entre 13 et 125 m
imprécis	Précision > 250 m	Augmenté au-delà de 125 m
milieu de rue	Pour les éléments dont le seul renseignement est la rue	Zone de présomption de vide comprenant a minima l'emprise cadastrale de la voirie concernée et une distance variable sur les parcelles adjacentes en fonction du type de cavité attendue.
centroïde de commune	Précision > 1000 m Pour les éléments dont le seul renseignement est la commune, le point est placé au centroïde de commune.	Pas de zone d'aléa
zone	Zone de présence de cavité insuffisamment précise (suspicion de cavité)	Zone de présomption de vide correspondant strictement à la zone

Tableau II.12: Précision de positionnement des éléments cartographiés

La valeur de la précision s'entend comme le diamètre du cercle dans lequel se trouve vraisemblablement l'objet cartographié. Par exemple, dans le cas d'un placement « précis », un indice ponctuel cartographié se trouve à une distance maximale estimée de 12,5 m à partir du point, soit 2,5 mm sur une cartographie au 1/5 000.

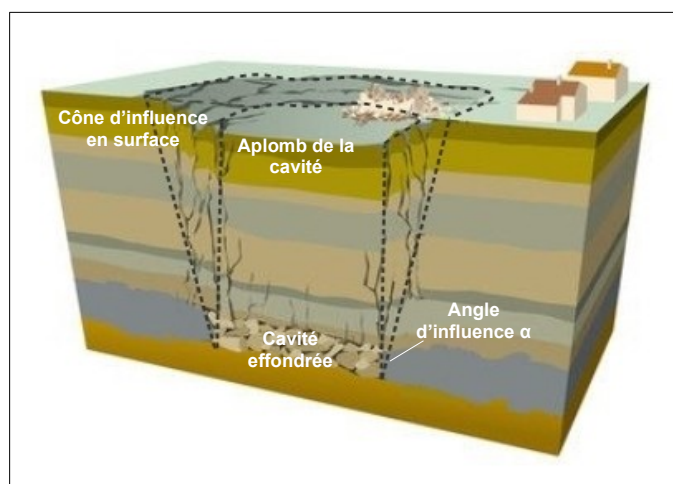


Figure II.18: schéma de l'angle d'influence (Graphies/MTES/AGR).



Figure II.19: exemple d'angle d'influence (photo d'illustration prise hors de la zone d'étude).

### II.6.3.2. Marge de recul – angle d'influence

L'aléa effondrement de cavités souterraines déborde systématiquement de l'emprise réelle des cavités justifiant son affichage. Il est tenu compte de l'impact que peut avoir un effondrement en bordure de carrière. En s'effondrant, le sol peut céder sous un certain angle d'influence, puis à long terme cherchera une nouvelle pente d'équilibre en régressant sur la bordure de l'effondrement. En cas de rupture en

limite d'une cavité, l'emprise du mouvement de terrain empiètera donc forcément au-delà de l'emprise réelle de la cavité (extension latérale supérieure à l'emprise réelle de la cavité). En surface, l'effondrement se fait ressentir au-delà de l'emprise de la cavité en développant un cône d'influence. Le schéma et la photo ci-dessus traduisent l'angle d'influence pouvant s'appliquer en bordure de cavité.

L'angle d'influence  $\alpha$  s'applique à partir du sol de la cavité. Sa projection (L) en surface répond à une règle trigonométrique. Elle est égale au produit de la tangente de la valeur de l'angle ( $\tan \alpha$ ) par la profondeur (P) de la cavité ( $\tan \alpha = \text{coté opposé (L)} / \text{coté adjacent (P)}$ ), soit  $L = P \times \tan \alpha$ .

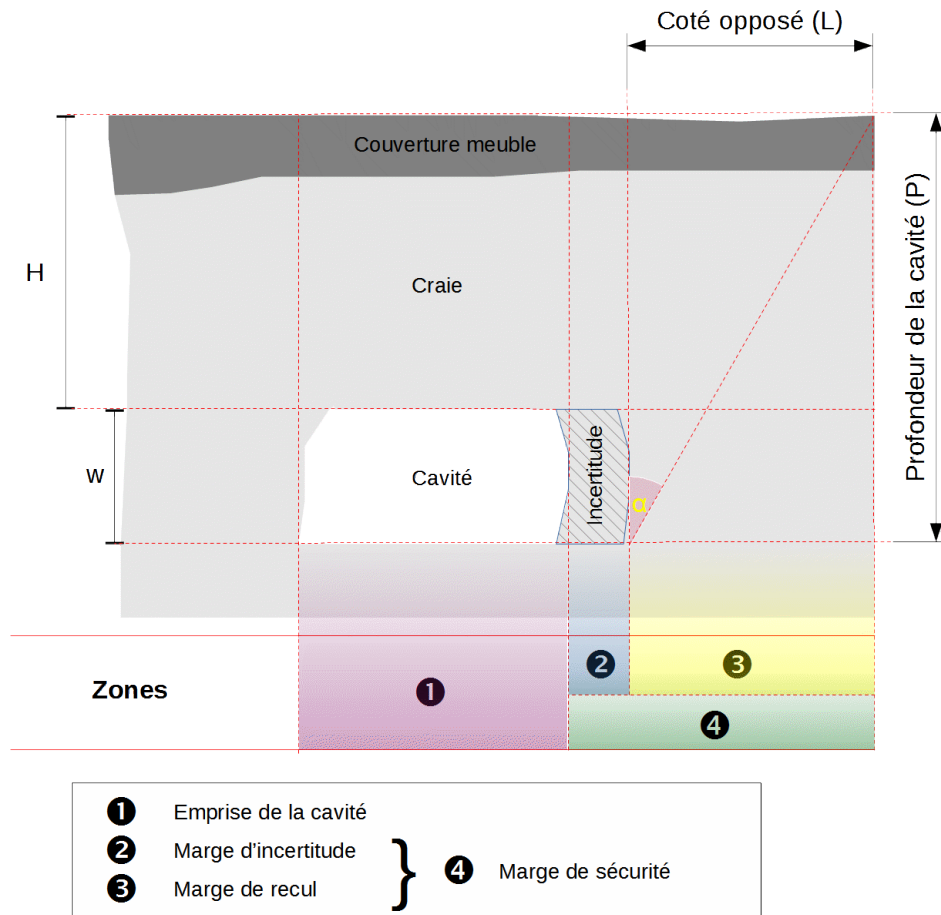


Figure II.20: Paramètre géométrique du calcul de l'angle d'influence et extensions des différentes marges en bordure de cavité.

Aucun effondrement d'importance avec impact latéral n'a été observé sur la zone d'étude. En conséquence, nous ne disposons donc pas d'angle d'influence de référence constaté sur le territoire de l'étude. Dans la pratique, l'angle d'influence appliqué en présence de craie ou de matériaux similaires (mêmes caractéristiques mécaniques) varie généralement entre  $20^\circ$  et  $30^\circ$ . Il peut être porté jusqu'à  $45^\circ$ , lorsque de fortes épaisseurs de matériaux meubles (plusieurs mètres, voire plus d'une dizaine de mètres) recouvrent le substratum (sommet du substratum très altéré, forte épaisseur de limon de surface, etc.).

**Un angle de  $30^\circ$  semble plus approprié aux conditions géologiques de la région d'Arras**, à la profondeur des cavités présentes et aux caractéristiques mécaniques apparentes de la craie en place. La roche qui a un aspect très tendre s'avère peu résistante et semble très sensible à l'eau (perte de résistance). Il est donc retenu pour être appliqué en périphérie des cavités cartographiées.

Nous retiendrons donc comme largeur de la zone d'influence :

$$L = P \times \tan(30^\circ) = P \times 0,58$$

NB : Dans le cas où nous ne disposons pas d'emprise de cavité, l'angle d'influence n'est pas calculé.

## II.6.4. Principes de représentation

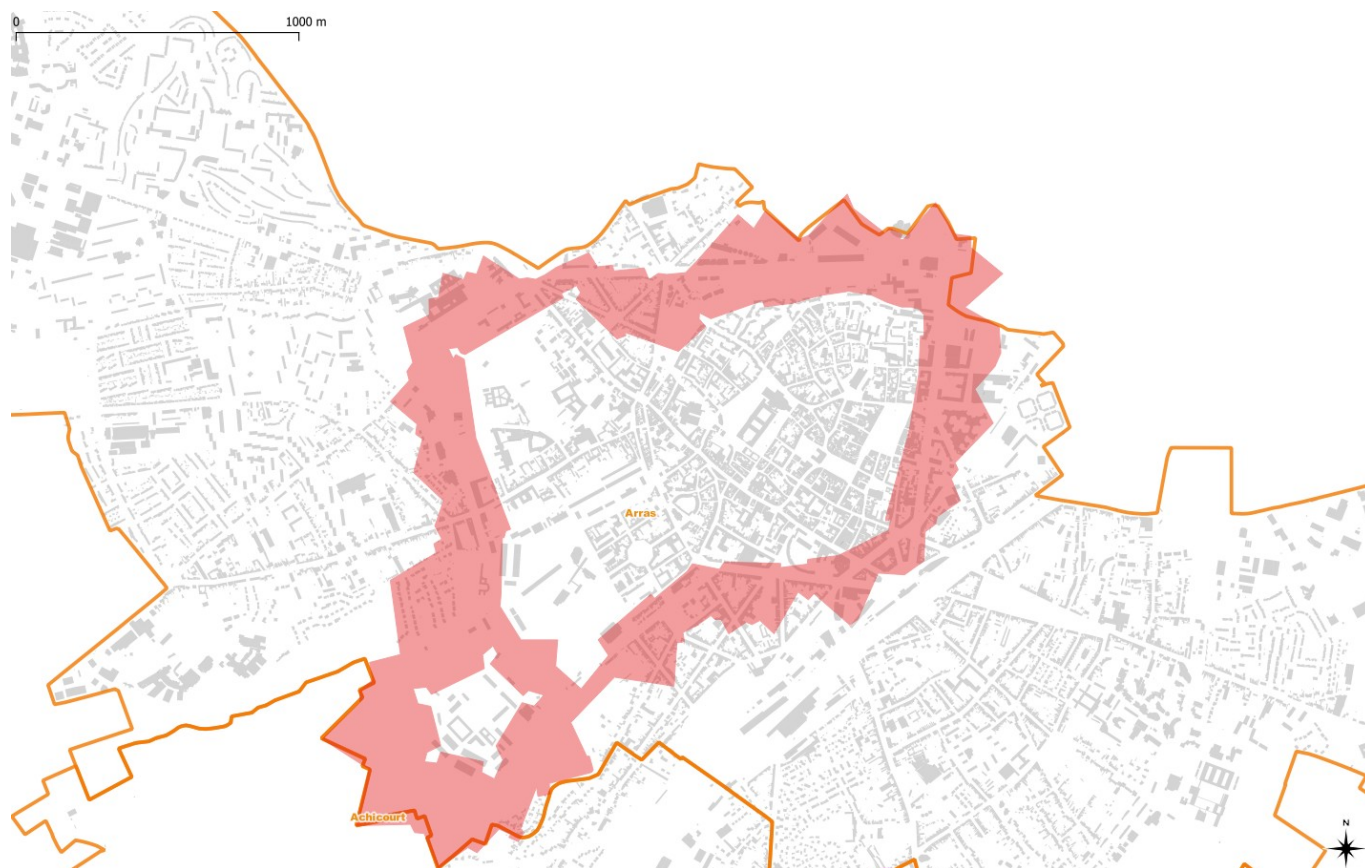


Figure II.21: Centre-ville historique d'Arras et ses anciens remparts (figuré rouge) issus de la digitalisation de la carte d'État-major de 1826 (XXX70).

La typologie des cavités est basée sur la localisation géographique des cavités. Si dans les anciens remparts, les cavités attendues (boves) ont de dimensions relativement faibles (quelques centaines de mètres carrés), les cavités à l'extérieur des remparts ont des proportions autrement plus importantes (jusqu'à plusieurs milliers de mètres carrés).

### II.6.4.1. Cas des cavités avec emprise, sans profondeur connue

En cas d'absence de données sur la profondeur d'une cavité cartographiée, on se basera sur les cavités de typologie semblable (bove, carrière, galerie, etc.) dans le secteur pour lui affecter une profondeur permettant de calculer la zone d'influence. Si plusieurs cavités se trouvent à proximité, la cote la plus pessimiste est retenue.

### II.6.4.2. Cas des cavités à placement ponctuel

Concernant les cavités non levées (désignation d'une parcelle, d'un numéro de rue, etc.), celles-ci sont cartographiées par un élément ponctuel. Il ne peut pas être appliqué d'angle d'influence puisque nous ne connaissons pas leur contour précis. Dans le cas où on dispose de données suffisamment étayées (rapport de visite, photographie, schéma), la largeur du tampon d'aléa est cartographiée en conséquence. Dans le cas contraire :

- les cavités de type bove, au vu des connaissances acquises, le périmètre de l'aléa est défini par une zone tampon fixe de 30 m à partir du centre de la limite parcellaire (augmenté de la précision de la donnée, soit la largeur de la parcelle) en bordure de la voie publique. Il a en effet été constaté que ce type de cavité se développe sous les voiries, avec des retours en direction du



bâti qui reste relativement limité de l'ordre d'une vingtaine de mètres et que leur tracé ne suit pas toujours strictement les limites parcellaires ;

- à l'extérieur de l'emprise des remparts, au vu de l'emprise des cavités connues (zone de grandes carrières), la zone d'aléa est portée à 100 m.
- Pour les cavités militaires de type « dugout » (voir II.5.5), en présence de données de localisation, l'emprise de l'aléa est portée à 15 m en sus de la marge d'incertitude. En présence de schémas permettant d'estimer la superficie de vide, la largeur de l'aléa pourra être augmentée en conséquence.

### **II.6.4.3. Indices et sondages en l'absence de cavité connue**

#### **a. Fontis, entrée de cavité**

Différents phénomènes ont été recensés en surface. Dans le cas d'un phénomène de type fontis, quand ceux-ci ne peuvent être liés avec certitude (reconnaissance de fontis, étude géotechnique complémentaire, etc.) avec une cavité connue, une **zone d'aléa de présomption de vide** est portée suivant les règles suivantes:

- dans la zone comprise dans les remparts (y compris ceux-ci) : zone tampon 30 m ;
- hors de la zone de rempart : zone tampon de 100 m.

#### **b. entrée et puis d'accès**

Pour les entrées et puits d'accès de cavités qui ne sont pas connus de manière certaine, une zone d'aléa de présomption est portée sur la cartographie d'aléas selon les distances précitées.

#### **c. Sondage**

Les sondages recoupant des vides francs ou remblayés sont qualifiés par un aléa d'effondrement de cavité dont la largeur correspond aux règles précitées. Dans le cas particulier de sondages recoupant des cavités dans l'emprise même des fortifications (zone rouge sur la figure II.21), la largeur de l'aléa est dépendant du type de cavité attendu (voir II.6.4.5).

#### **d. Anomalie microgravimétrique et affaissement**

Pour le cas des anomalies microgravimétriques et les phénomènes d'affaissement, ceux-ci sont traités s'ils se trouvent dans des zones dépourvus de cavités souterraines connues ou de zones de tranchées. La zone d'aléa appliquée sera traitée manuellement en fonction du contexte local (géologie, types de cavité). Pour les affaissements, la mise en pente du terrain, la récurrence du phénomène et le contexte souterrain local (densité et type de vide) seront étudiés si ces données sont disponibles.

#### **e. Puits et débouillage de puits**

Les puits à eaux encore accessibles et reconnus comme tels ne sont pas portés sur les cartographies. Pour les puits non liés à des cavités connues et qui ne sont pas reconnues (supposé comblé), un aléa d'effondrement est porté sur un diamètre de 6 m, correspondant approximativement au diamètre courant des puits (1,5 m), augmenté d'une distance de recul prenant en compte les matériaux de couverture de faible qualité. Cet aléa correspond à l'éventuel débouillage du puits.

Une particularité a été remarquée dans plusieurs cavités de l'Arrageois, à savoir que des puits sont dits mixtes, dans le sens où il s'agit de puits à eau recoupant des cavités. Ainsi, pour les **débouillages de**

**puits** dont aucune reconnaissance n'a été réalisée, ils sont présumés liés à une cavité et font l'objet d'un zonage de présomption de vide :

- dans la zone comprise dans les remparts : zone tampon 30 m ;
- hors de la zone de rempart : zone tampon de 100 m.

Dans le cas où des informations pourraient faire état d'un possible niveau de cavité accessible par un puits, la cavité est représentée par ses propres règles de zonage.

#### **II.6.4.4. Incertitude liée à la continuité de la cavité**

On peut trouver plusieurs situations où il existe une incertitude sur la continuité de la cavité :

- les remblais de surface ou de carrière fermant un secteur de la cavité (pas de visibilité sur la paroi à l'arrière du remblai et amorce de galerie) ;
- des secteurs murés (présence d'une discontinuité de matériaux sur une paroi maçonnée par exemple) ;
- pour les cavités non accessibles, les galeries ou parois non fermées sur les plans exploités (non cartées).

Dans ces cas, des zones tampons de présomption d'aléas de même niveau que la cavité viennent s'ajouter à l'emprise d'aléa lié à la cavité pour tenir compte de ces possibles extensions :

- dans la zone comprise dans les remparts : zone tampon 30 m ;
- hors de la zone de rempart : zone tampon de 50 m.

Pour le cas des galeries dont le prolongement ou la distance est connu, mais non accessible (chute de toit, remblais, murés, etc.) et, de ce fait, non carté, la zone tampon est dimensionnée en fonction des éléments de distance connus et selon un faisceau de 180° dans la direction de la galerie.

#### **II.6.4.5. Zone des anciennes fortifications**

Dans l'emprise même de la zone des fortifications démantelées (zone de couleur brique sur la figure II.21), des sondages montrent de fortes épaisseurs de remblais ainsi que des vides résiduels (défaut de compactage, tassement différentiel, évolution naturelle des terrains) de faibles hauteurs dans les remblais comblant les fossés. Les remblais des fortifications ne sont pas pris en compte dans la présente étude (voir II.2). Cependant, un aléa d'effondrement est porté sur les sondages (voir II.6.4.3) de cette zone présentant des vides francs ou remblayés, concordant vraisemblablement avec la présence de cavité (hauteur et profondeur).

La distance appliquée est de 30 à 100 m suivant le type de cavité attendu : bove ou carrière en chambres et piliers. Seules la profondeur des vides et leur reconnaissance (passage caméra) permettraient de le définir avec certitude.

### **II.6.5. Synthèse des phénomènes attendus et des aléas**

#### **II.6.5.1. Phénomènes attendus par type de cavité**

L'inspection des cavités souterraines du secteur d'étude a montré une dégradation générale importante des édifices. Il convient de distinguer :

- **les cavités maçonnées (boves)** : ces cavités sont plus ou moins bien entretenues, mais assurent généralement la tenue des terrains. L'observation de nombreuses reprises en sous-œuvre ou de renforts de structure, par exemple, montre bien que des défaillances sont possibles.

L'emprise généralement restreinte de ces vides limite les effets possibles en surface, principalement sous forme d'effondrement localisé d'intensité très limitée à élevée.

- **les galeries militaires de liaison datant de la Première Guerre mondiale et les sapes** : Il s'agit de cavités linéaires taillées dans la craie crue : la largeur de ces galeries est faible au regard de leur développement dans le plan. Les effets possibles en surface sont principalement sous forme d'effondrement localisé d'intensité très limitée à modérée.
- **les cavités en chambres et piliers** : anciennes carrières d'exploitation de la craie, en partie réutilisées pendant les deux conflits mondiaux, ces cavités peuvent avoir de grandes dimensions. La craie naturellement fracturée présente souvent des faiblesses au niveau du ciel et des piliers. Les effets possibles en surface sont nombreux. Les phénomènes les plus probables en surface sont des effondrements localisés d'intensité très limitée (cavité remblayée) à élevée. Des effondrements généralisés sont possibles dans des secteurs dégradés à très dégradés de certaine cavité.
- **les vides associés aux tranchées de la Première Guerre mondiale** : d'un développement limité, ces cavités annexes (abris, dépôts) non remblayées ou mal remblayées sont globalement très mal identifiées car indiquées partiellement sur les cartes militaires historiques. L'emprise généralement restreinte de ces vides limite les effets possibles en surface (voir II.5.5).
- **les ruptures de têtes de puits ou des bouchons de catiche** : il existe de nombreux puits permettant d'accéder aux travaux souterrains. Certains ont été obstrués et oubliés. La rupture d'une tête de puits, résultant de l'évolution défavorable des parois du puits, entraîne en surface un effondrement localisé d'intensité limitée à modérée

Dans le cas des cavités ouvertes au public (bove de la Place-des-Héros et Carrière Wellington) et faisant l'objet de contrôles périodiques, conformément au guide méthodologique PPR les cavités doivent être traitées comme des cavités abandonnées. Néanmoins, ces cavités pourront faire l'objet de mesures réglementaires spécifiques dans le règlement.

### II.6.5.2. Règles de cartographie de l'aléa

L'ensemble des règles édicté précédemment sont reprises dans le tableau suivant :

Tableau II.13: Tableau récapitulatif des zones d'aléas en fonction de la localisation et du type de cavité

Type de cavité / indices	Zone comprise dans les remparts (Zone de fortification incluse)		Zone hors des remparts	
	Zone d'aléa (hors précision)	Type d'aléa	Zone d'aléa (hors précision)	Type d'aléa
Emprise de cavité connue	Angle d'influence	Effondrement	Angle d'influence	Effondrement
Secteur muré, non carté, remblayé ou effondré d'une cavité	30 m	Présomption d'effondrement	50 m	Présomption d'effondrement
Cavité ponctuelle (cavité d'exploitation, boves et type inconnu)	Selon données disponibles (croquis avec échelle) ou mesures de la cavité connues, sinon : 30 m	Effondrement ou présomption d'effondrement*	Selon données disponibles (croquis avec échelle) ou mesures de la cavité connues, sinon : 100 m	Effondrement ou présomption d'effondrement*

	<b>Zone comprise dans les remparts (Zone de fortification incluse)</b>		<b>Zone hors des remparts</b>	
<b>Type de cavité / indices</b>	<b>Zone d'aléa (hors précision)</b>	<b>Type d'aléa</b>	<b>Zone d'aléa (hors précision)</b>	<b>Type d'aléa</b>
Cavité ponctuelle de type galerie	Fonction des données disponibles (distance) pouvant être augmenté au cas par cas 30 m	Effondrement ou présomption d'effondrement*	fonction des données disponibles (distance) pouvant être augmenté au cas par cas 50 m	Effondrement ou présomption d'effondrement*
Cavité ponctuelle de type militaire (dugout, abris)	Selon données disponibles (croquis avec échelle) ou mesures de la cavité connues, sinon : 15 m	Effondrement ou présomption d'effondrement*	Selon données disponibles (croquis avec échelle) ou mesures de la cavité connues, sinon : 15 m	Effondrement ou présomption d'effondrement*
Sondage rencontrant un vide ou un vide remblayé	30 m ou 100 m (en fonction de la typologie de cavité supposée)	Effondrement ou présomption d'effondrement*	100 m	Effondrement ou présomption d'effondrement*
Affaissement	Au cas par cas	Présomption d'effondrement	Au cas par cas	Présomption d'effondrement
Anomalie microgavimétrique	Au cas par cas	Présomption d'effondrement	Au cas par cas	Présomption d'effondrement
Fontis, débouillage de puits (non liés à une cavité connue)	30 m	Effondrement ou présomption d'effondrement*	100 m	Effondrement ou présomption d'effondrement*
Puits non reconnu (hors puits de carrière)	3 m	Effondrement	3 m	Effondrement
Tranchées	Non applicable	Non applicable	15 m	Aléa tranchée (voir II.5.5)

\* : l'aléa d'effondrement est retenu pour les cavités certaines, l'aléa de présomption pour les autres vraisemblance (voir Tableau II.7).

## III. Volet pédagogique

### III.1. Rappel sur la notion de risque

Le risque est la conjonction d'un aléa avec un enjeu.

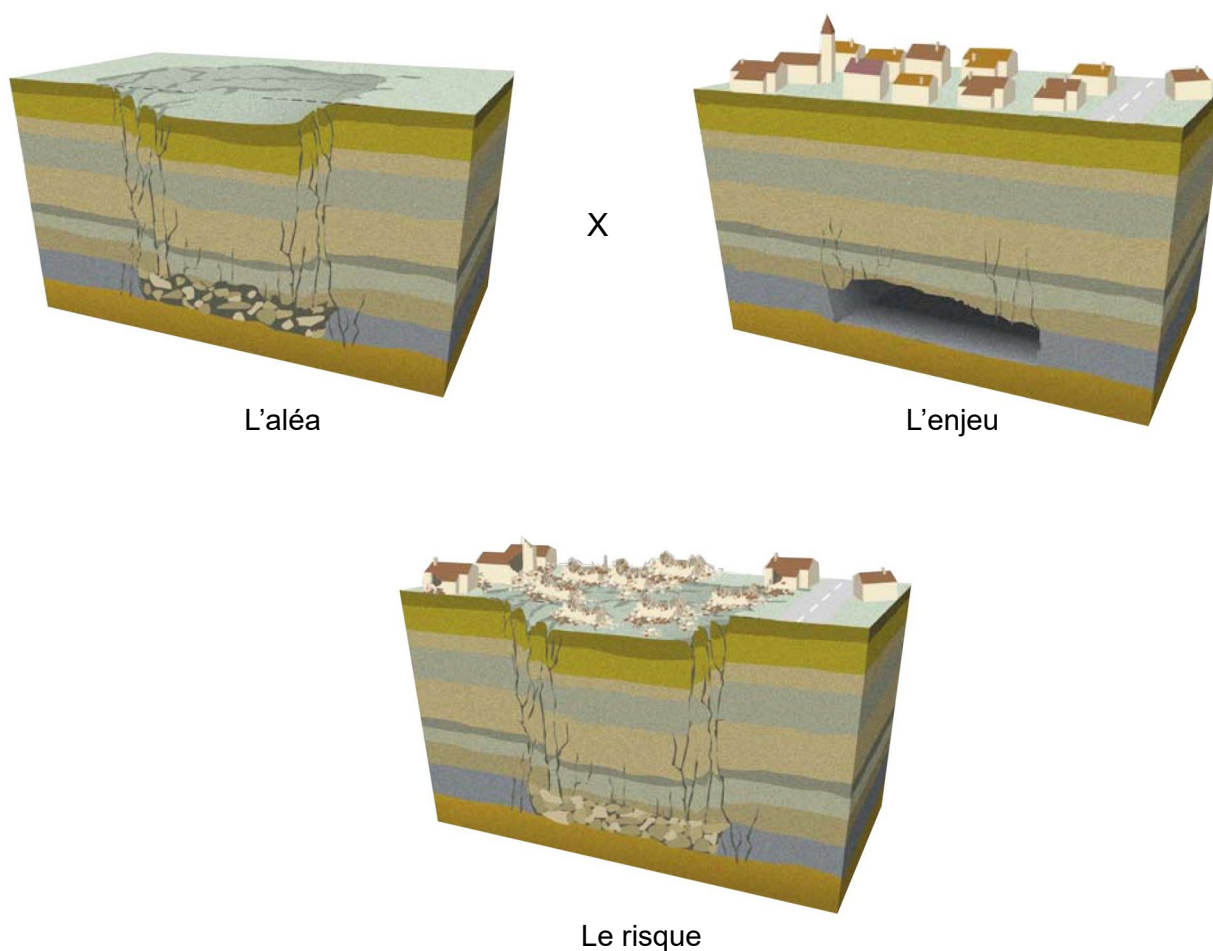


Figure III.1: schéma aléas x enjeux = risque

### III.2. Phénomènes en présence

Dans la région d'Arras, les mouvements de terrain associés aux cavités souterraines sont principalement des **effondrements localisés** et des **affaissements**.

*Historiquement, de nombreux effondrements se sont produits dans l'agglomération, aussi bien dans la vieille ville que dans les quartiers périphériques plus récents.*

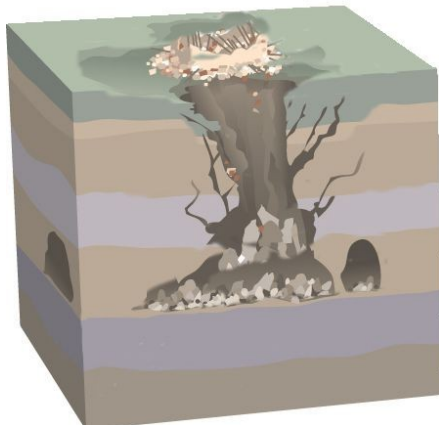


Figure III.2: Fontis

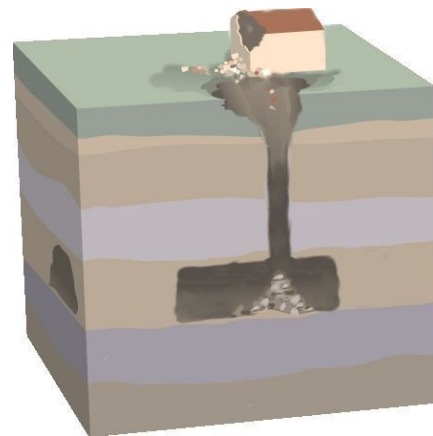


Figure III.3: Rupture de tête de puits ou d'un bouchon de catiche

En surface **les effondrements localisés** (fontis, ruptures de têtes de puits) occasionnent des trous béants de petite à moyenne dimension (de 1 à quelques mètres de diamètre). Ces désordres sont la manifestation d'effondrements qui se produisent en profondeur et qui, s'ils ne sont pas traités, peuvent occasionner des désordres plus importants.

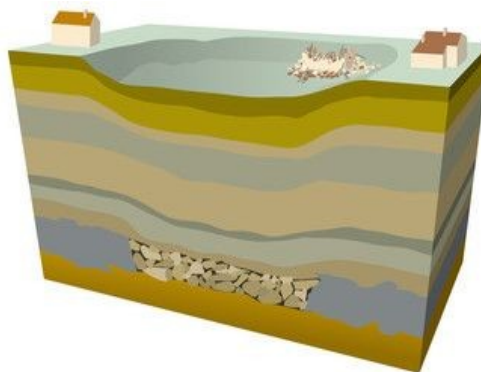


Figure III.4: Affaissement

Les **affaissements** produisent des déformations de la surface du sol, sans rupture en surface. Lorsque la cavité est trop petite ou trop profonde, les cloches de fontis qui se forment ne parviennent pas jusqu'à la surface, grâce à l'auto-comblement de la cavité du fait du foisonnement des matériaux (les éléments éboulés tiennent plus de place que la roche en place). Néanmoins le sol peut se déformer, induisant une mise en pente plus ou moins forte du terrain, entraînant une fissuration du bâti.

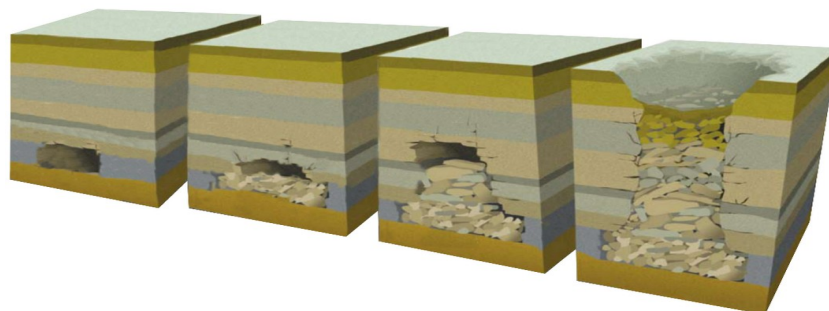


Figure III.5: Phénomène de foisonnement

Le **phénomène d'effondrement généralisé** occasionné par la rupture des piliers qui soutiennent le toit de la cavité est peu connu sur la zone d'étude (un seul événement historique en 1925). Il désigne une rupture soudaine du toit de la cavité sur une étendue importante, voire très importante, pouvant concerner l'intégralité d'une cavité. Le risque d'effondrement généralisé est d'autant plus fort que le taux de défrètement (quantité de matériaux extraits par unité de volume) est important et que les piliers sont en mauvais état (incapacité à soutenir le toit).

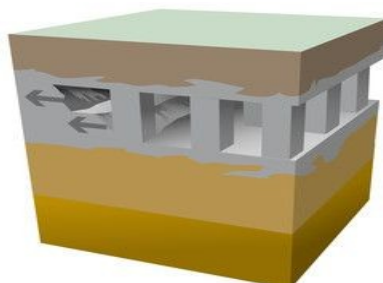


Figure III.6: Exploitation des carrières en chambres et piliers

### **III.3. Qualification de l'aléa**

La définition officielle de l'aléa est la suivante : phénomène naturel (inondation, mouvement de terrain, séisme, avalanche, incendies de forêts, etc.) d'occurrence et d'intensité données.

Pour le PPRN d'Achicourt, Arras et Beaurains, l'aléa sera donc la caractérisation de l'intensité des phénomènes redoutés (effondrement généralisé, fontis, affaissement) en fonction de la probabilité de voir le phénomène se produire en un point.

La cartographie de l'aléa sera réalisée en considérant un aléa de référence pour lequel seront appréciées une intensité et une probabilité d'occurrence.

#### **III.3.1. L'intensité du phénomène**

L'intensité d'un phénomène traduit l'impact du phénomène sur son environnement. Par exemple, l'intensité de l'effondrement d'une cavité haute sous plafond sera beaucoup plus importante que celle d'une cavité de faible hauteur. Dans cet exemple, le volume de vide à compenser croît avec la hauteur de voûte, donc les répercussions en surface du mouvement de terrain sont plus conséquentes. L'intensité d'un phénomène peut donc être estimée en jugeant le contexte et les caractéristiques des vides pouvant conduire à des mouvements de terrain. D'autres facteurs sont également à prendre en compte comme le volume de vide, la profondeur de la cavité ou encore l'épaisseur et la nature du recouvrement.

##### **III.3.1.1. Intensité des affaissements**

L'impact d'un affaissement à la surface du terrain se traduit par la formation d'une dépression plus ou moins prononcée de la surface du sol. Elle induit une mise en pente du sol en périphérie du phénomène et un mouvement vertical dans la partie centrale de la zone impactée. Les dégâts aux biens sont donc liés aux déformations différentielles verticales subies et aux efforts d'extension et de compression qui s'exercent sur le bâti aux points de courbure du terrain. Il s'ensuit une fissuration des bâtiments. Ces fissures sont obliques, orientées d'environ 45° par rapport à la verticale.

L'ampleur des déformations de terrain dépend de plusieurs facteurs. Les principaux sont la hauteur de vide (cavité de très faible hauteur sous plafond ou vide résiduel non remblayé), l'épaisseur du recouvrement de la cavité (estimation de la compensation du vide par le foisonnement des matériaux en fonction de l'épaisseur de cerveau), l'étendue de la cavité, la méthode d'exploitation, le pendage stratigraphique, la présence de failles, etc.

Dans le cas d'affaissement lié à des cavités de faible profondeur dont l'étendue est limitée, la valeur de la mise en pente est difficile à apprécier. Il a été choisi de définir un niveau d'intensité unique, de classe « très limitée ».

### **III.3.1.2. Effondrement localisé**

Le diamètre d'un fontis peut varier de quelques décimètres à plusieurs mètres, voire plus. Le phénomène entraîne donc un trou avec un décrochement de terrain plus ou moins redressé en surface (bordure en forme évasée liée au talutage naturel du terrain). Sa profondeur peut varier en fonction de la réception et du calage naturel des matériaux au fond de la cavité et de la compensation du vide par le foisonnement sous la voûte qui a cédé.

Les dégâts dus à un effondrement localisé sont principalement liés aux graves défauts de portance qui peuvent survenir au droit du phénomène (par exemple si le phénomène se manifeste sous des fondations). Leur gravité augmentera proportionnellement à l'ampleur de l'effondrement. Ainsi, un bâti touché par un fontis très localisé peut subir des dommages équivalents à un tassement différentiel alors qu'un fontis plus important (plusieurs mètres de diamètre) peut infliger des dégâts structurels plus conséquents, voire une ruine de la construction.

L'intensité des effondrements localisés est définie selon l'importance des phénomènes. Elle est hiérarchisée en trois classes exprimées en fonction du diamètre des effondrements, de « limitée » à « élevée » (diamètre > 10 m).

### **III.3.1.3. Effondrement généralisé**

Un effondrement généralisé (ou en masse) traduit un phénomène d'étendue importante, voire très importante, pouvant concerner l'intégralité d'une cavité. Il est lié à l'état géotechnique général des cavités, dont en particulier les taux de défrètement, la qualité des points d'appui (piliers, bordures des cavités), les caractéristiques du recouvrement (épaisseur, nature des matériaux), la résistance de la roche (valeur connue ou ordre de grandeur estimé), la fissuration, etc. Le phénomène peut très fortement chahuter le sol en provoquant d'importants décrochements à la surface du terrain (plusieurs mètres), jusqu'à conduire à une situation chaotique.

De tels effondrements peuvent entraîner la ruine des biens situés en surface. Les dégâts peuvent donc être très dommageables et les parades pour s'en prémunir demandent la mise en œuvre de moyens lourds (par exemple : comblement intégral de cavité).

L'intensité d'un effondrement généralisé est donc systématiquement considérée « Élevée ».

## **III.3.2. Probabilité d'occurrence**

Les mouvements de terrain sont des phénomènes non périodiques. Ils sont quasiment imprévisibles dans le temps. Ils évoluent généralement lentement, sur de longues périodes, et peuvent connaître de brusques accélérations.

L'expertise géotechnique des cavités (analyse de la fragilité des piliers et du toit) et l'analyse des secteurs concernés par la présence avérée ou supposée de vides permettent d'établir un bilan sur la prédisposition d'un site à la rupture.



### **III.3.2.1. Probabilité d'occurrence pour les affaissements**

La prédisposition d'un site au phénomène d'affaissement est généralement liée à la nature de la cavité, aux conditions de remblaiement des parties comblées, au contexte encaissant.

- nature des cavités (hauteur de voûte, forme des cavités) ;
- profondeur des cavités et nature du recouvrement) ;
- nature de la roche et résistance connue ou estimable par observation ;
- comblement par bourrage de remblais et estimation des vides résiduels au niveau de la voûte ;
- état géotechnique connu du site ;
- présence d'eau ;
- etc.

L'appréciation de ces facteurs, sur la base des investigations réalisées préalablement (étude de terrain, enquêtes et exploitation de la bibliographique), permet d'estimer à dire d'expert la prédisposition d'un site aux affaissements de terrain classée de « faible » (par exemple une cavité totalement remblayée) à « fort » (pour une cavité remblayée par bourrage avec vides résiduels).

### **III.3.2.2. Probabilité d'occurrence pour les effondrements localisés**

La prédisposition d'un site aux effondrements localisés est plutôt liée à la présence de secteurs localement dégradés dans les cavités. Plusieurs types d'effondrements localisés peuvent se produire : chutes de toit, rupture d'un pilier, débouillage de puits. La prédisposition aux effondrements localisés est donc estimée en notant toutes anomalies géotechniques pouvant fragiliser les édifices :

- présence de cloche de fontis ;
- fissuration de la voûte ;
- nature des terrains de recouvrement ;
- épaisseur du recouvrement ;
- fissuration des piliers ;
- estimation de la répartition des charges entre les piliers, résistance apparente des piliers ;
- présence d'eau et sensibilité de la roche à l'eau ;
- portées entre appuis (longueur de voûte non soutenue) et taux de défruitement ;
- présence de conduits karstiques au niveau des voûtes ;
- nature des matériaux de remblaiement des puits et stabilisation de ces derniers ;
- etc ;

L'appréciation de ces facteurs sur la base de l'inspection géotechnique permet d'estimer à dire d'expert la prédisposition d'un site aux effondrements localisés.

Dans le cas des effondrements localisés, les taux de défruitement donnent une indication supplémentaire sur les espaces de vides potentiellement présents entre les piliers. Ils sont donc exploités en complément des portées entre appuis mesurables sur les plans. Plus une surface de vide est importante entre des piliers, plus la voûte d'une cavité est théoriquement fragile, car elle a tendance à se décompresser plus vite et elle est exposée à des efforts de flexion plus conséquents. La valeur des taux de défruitement permet donc de juger, à l'échelle d'une cavité, la plus ou moins forte prédisposition d'un site à l'apparition de cloches de fontis, qui peuvent ensuite progresser jusqu'à la surface, ou à l'effondrement localisé de la voûte par rupture soudaine.

La qualification de la prédisposition aux effondrements localisés est caractérisée de « faible » (cavité avec plus de 10 m de recouvrement, en bon état, avec un taux de défruitement inférieur à 60 %) à « fort » (cavité avec moins de 5 m de recouvrement, piliers et toit en mauvais état, avec un taux de défruitement supérieur à 75 %).

### III.3.2.3. Probabilité d'occurrence pour les effondrements généralisés

Les effondrements généralisés peuvent concerner essentiellement les anciennes carrières étendues, **exploitées par la technique des chambres et piliers**. La prédisposition du phénomène répond en partie aux mêmes critères que pour les effondrements localisés (état des piliers), avec un facteur supplémentaire d'importance qui concerne les contraintes s'exerçant sur un grand nombre de piliers. Ces derniers fortement sollicités par le poids de la voûte à supporter peuvent avoir atteint leur limite de résistance, voire pour certains déjà présenter un état de ruine avancé. Des ruptures sont alors possibles (ruptures simultanées de plusieurs piliers ou rupture individuelle de piliers entraînant par « effet de château de cartes » la chute d'autres éléments porteurs.

Les critères « taux de défrètement », « recouvrement » et « fissuration des piliers » sont particulièrement décisifs dans l'estimation de la prédisposition d'une cavité à un effondrement généralisé :

Deux cas se présentent :

1. Cas des cavités en bon état apparent, sans signe de déstabilisation :
  - pas de présence d'eau temporaire ou permanente
  - pas de pilier présentant de fissuration importante
2. Cas des cavités dégradés :
  - présence d'eau temporaire ou permanente
  - pilier ou groupe de piliers présentant une fissuration importante

Tableau III.1: Probabilité d'occurrence « effondrements généralisés » – cas 1

Recouvrement	< 10 m	10 à 20 m	> 20 m
Taux de défrètement			
< 50 %			Faible
50-55 %		Faible	Faible
55-60 %		Faible	Faible
60-65 %	Faible	Faible	Moyenne
65-70 %	Faible	Moyenne	Moyenne
70-75 %	Faible	Moyenne	Moyenne
75-80 %	Moyenne	Moyenne	Forte
80-85 %	Moyenne	Forte	Forte
> 85 %	Forte	Forte	Forte

Tableau III.2: Probabilité d'occurrence « effondrements généralisés » – cas 2

Recouvrement	< 10 m	10 à 20 m	> 20 m
Taux de défrètement			
< 50 %	Faible	Faible	Faible
50-55 %	Faible	Faible	Moyenne
55-60 %	Faible	Moyenne	Moyenne
60-65 %	Faible	Moyenne	Forte
65-70 %	Moyenne	Forte	Forte

70-75 %	Moyenne	Forte	Forte
75-80 %	Forte	Forte	Forte
80-85 %	Forte	Forte	Forte
> 85 %	Forte	Forte	Forte

À cela a été ajouté dans les critères de probabilité d'occurrence « forte » les **cavités inaccessibles**, mais de présence certaine, afin d'aller dans le sens de la sécurité.

### III.3.2.4. Probabilité d'occurrence en cas de « présomption de vides »

Certaines cavités signalées sont inaccessibles car condamnées et peu d'informations sont disponibles à leur sujet. Dans ce cas, seuls des témoignages ou des plans très approximatifs anciens permettent de se faire une idée sur la présence possible de vide et sur leur extension, en cherchant parallèlement d'autres indices de confirmation.

Des indices de terrain seuls peuvent également traduire la présence possible de cavités oubliées (par exemple dépressions de terrain, vestiges d'installation de surface, etc.), sans qu'aucun témoignage ne le confirme.

Dans ces cas de figure, la présence de cavité ne peut donc pas être affirmée avec certitude, ni localisée, même lorsque des témoignages apportent quelques précisions. Seule une présomption de vides peut être mise en avant, avec à la clé la détermination d'une probabilité d'occurrence de présomption de vide (ou prédisposition à la rupture). Il convient toutefois de pondérer cette dernière en intégrant à la démarche les lacunes d'information. Cette nuance permet de tenir compte des incertitudes et des imprécisions apparaissant sur de tels sites, sans minimiser les règles sécuritaires devant encadrer de tels cas de figure.

La présomption de vide est graduée en trois niveaux : improbable, probable et très probable. Elle est directement corrélée à la probabilité d'occurrence selon le tableau ci-dessous :

Présomption	Probabilité d'occurrence
Improbable	Faible
Probable	Moyenne
Très probable, voire certaine	Forte
Une cavité de présence certaine n'est pas une présomption de vide.	-

Tableau III.3: Probabilité d'occurrence « présomption de vides » retenue

### III.3.3. Hiérarchisation de l'aléa lié à la présence de cavités souterraines

Le niveau d'aléa est évalué en croisant l'intensité établie du phénomène avec sa probabilité d'occurrence (ou prédisposition à la rupture). Le niveau d'aléa croît proportionnellement à l'élévation de ces deux facteurs, comme schématisé par le tableau III.4.

L'étude menée à l'échelle du territoire (prospections de terrain, visites de cavités, enquêtes de terrain, exploitation d'archives, exploitation de la bibliographie, études techniques existantes) permet d'évaluer de façon la plus objective possible les facteurs d'intensité et de probabilité d'occurrence. Cette analyse globale permet une meilleure connaissance des cavités présentes sur du territoire, avec toutefois certaines zones de doutes qui ne peuvent pas être levées. L'aléa mouvement de terrain lié à la présence

de cavités souterraines a donc été cartographié en intégrant cet ensemble d'informations et en s'adaptant aux doutes subsistants. Sa hiérarchisation s'est appuyée sur la grille de traduction suivante.

Tableau III.4: Hiérarchisation de l'aléa lié à la présence de cavités souterraines

Probabilité d'occurrence	Faible	Moyenne	Forte
Intensité			
Très limitée	Faible (F1a)	Faible (F1a)	Moyen (F2a)
Limitée	Faible (F1)	Moyen (F2)	Moyen (F2)
Modérée	Moyen (F2)	Moyen (F2)	Fort (F3)
Élevée	Moyen (F2)	Fort (F3)	Très fort (F4)

Un indice « a » est utilisé pour cartographier les zones liées à une intensité très limitée (phénomène d'affaissement). L'aléa lié à la présomption de vide est cartographié à l'aide d'un indice « p ».

À cette grille de hiérarchisation de l'aléa, nous ajouterons le cas de figure des cavités comblées par injection de coulis de ciment dans le respect des règles de l'art (présence de sondage de contrôle notamment). L'aléa est ramené à un niveau négligeable au niveau des secteurs ainsi traités puisque le vide est supprimé à l'aide d'un matériau « plein » de substitution. Un niveau d'aléa négligeable est donc considéré dans ce cas de figure. Cet affichage permet de mémoriser les travaux réalisés et de tenir informer les propriétaires sur leur existence.

Tableau III.5: Aléa lié aux secteurs comblés par injection

Catégorie	Aléa
Cavité comblée par injection de coulis de ciment avec clavage de finition et forage de contrôle	Négligeable (F0)

### III.3.4. Les tranchées et ouvrages militaires annexes

Les tranchées de surface et les cratères d'explosion des sapes ont été remblayés avec des matériaux divers à la sortie de la guerre. Des tassements peuvent y survenir du fait de l'évolution des matériaux et notamment des matières putrescibles.

Les abris de tranchée souterrains (type dugout), sont peu représentés sur les cartes de tranchées, vraisemblablement du fait de leur grand nombre qui peut nuire à la lisibilité de la carte. Si certains abris sont connus grâce à des documents mentionnant leurs coordonnées, ils sont loin d'être exhaustifs. Dans leur modèle standard, ces abris rectangulaires (2 x 10 m, une hauteur de 2 m à une profondeur de 7 à 8 m) se trouvent dans

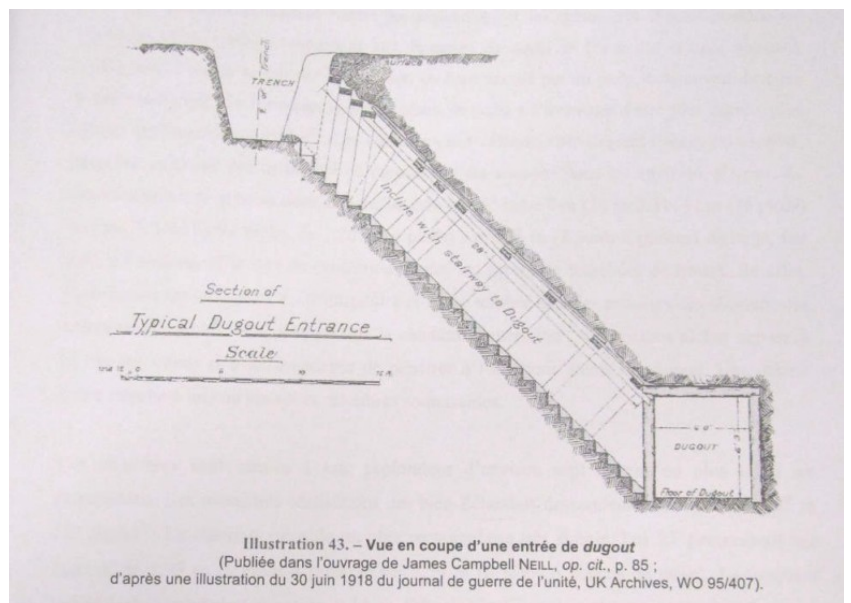


Figure III.7: Vue en coup d'une entrée de dugout. Source: A.Byledbal

une bande de 10 m le long des tranchées. Des abris plus grands peuvent exister. Afin de tenir compte de ces incertitudes, une bande d'aléas de 20 m de largeur est présente le long des tranchées cartographiées, augmentée de la marge d'incertitude. Dans la zone des remparts d'Arras, cette bande n'est pas présente, de nombreux abris (caves, boves) étant possibles hors des tranchées.

Afin de tenir compte des phénomènes liés aux tassements et effondrement lié à ces ouvrages, un aléa spécifique de tranchées est cartographié.

*Tableau III.6: Aléa lié aux secteurs de tranchées*

Catégorie	Aléa
<b>Zone de tranchées avec cavités annexes vraisemblable</b>	Faible (T1)

## ***IV. Calendrier du volet « aléas » du PPRN***

La fin de la phase de qualification était initialement prévue pour fin avril 2019.

Les levés topographiques ont été réalisés mi-mars 2019, de telle sorte que les nouvelles informations soient disponibles courant avril.

La phase « aléas » a été prolongée jusqu'au début de l'année 2020 afin de prendre en compte un certain nombre de documents nouveaux apportant des informations inédites sur la présence de cavité dans la zone d'étude.

## V. Bibliographie

1. Matthieu Caudron, Fabrice Emeriault, Marwan Al Heib. *Effondrement de cavités souterraines a faible profondeur et dommages induits aux ouvrages en surface. Évaluation et gestion des risques liés aux carrières souterraines abandonnées : séminaire de restitution et de valorisation des travaux* INERIS - réseau des LPC, 2005, Paris, France. pp.246-256. Ineris-00145380.
2. Jean-Jacques Tritsch. *Les mécanismes de ruptures des carrières souterraines abandonnées. Evaluation et gestion des risques liés aux carrières souterraines abandonnées : séminaire de restitution et de valorisation des travaux*. INERIS -réseau des LPC, May 2005, Paris, France. pp.74-92. ineris-00972493
3. *Guide technique – Mise en sécurité des cavités souterraines d’origine anthropique – Surveillance – Traitement*. CEREMA, Ministère de la transition écologique et solidaire, 2007.
4. *Évaluation et traitement du risque de fontis lié à l’exploitation minière – Rapport d’étude – DRS-07-86090-05803A*. INERIS, 2007.
5. Christophe Didier, Romuald Salmon. *Un modèle de calcul des hauteurs prévisibles de remontée de fontis à l’aplomb d’exploitations souterraines peu profondes*. Revue française de Géotechnique, 2010, pp.21-36. ineris-00961756
6. *Plan de prévention des risques naturels – Cavité souterraines abandonnées – Guide méthodologique*. Ministère de l’écologie, du développement durable et de l’énergie, 2012.
7. *Guide de dispositions constructives pour le bâti neuf situé en zone d’aléa de type fontis*. CSTB, 2012.
8. *Les soldats fantômes de la Grande Guerre souterraine, 1915-1919 : de l’immigrant pākehā au vétéran oublié : les hommes de la New Zealand Engineers Tunnelling Company*. Thèse de doctorat en Histoire contemporaine. Anthony Byledbał, sous la direction de Sophie-Anne Leterrier, 11/12/2012.
9. *Le diagnostic de stabilité des carrières souterraines abandonnées – Guide méthodologique*. IFSTTAR, 2014.
10. *Guide de surveillance des cavités souterraines d’origine anthropique – Rapport d’étude – DRS-16-156834-00810B*. INERIS, 2016.
11. Yaghkob Ikezouhene. *Analyse numérique discrète de l’aléa fontis et du foisonnement associés aux cavités souterraines*. Mécanique des matériaux [physics.class-ph]. Université Paris-Est, 2017. Français. NNT : 2017PESC1109. Tel-01680864

## VI. Glossaire

**Aléa** : Phénomène naturel (inondation, mouvement de terrain, séisme, avalanche, incendies de forêts, etc.) d'occurrence et d'intensité données. En ce qui concerne les mouvements de terrain, par exemple, la probabilité d'occurrence paraît souvent difficile à estimer. On recourra alors à une approche qui s'appuiera sur l'évaluation de la prédisposition du site au type de phénomène concerné.

**Aléa de référence** : Phénomène naturel d'occurrence et d'intensité données servant de référence pour définir la réglementation du PPRN.

**Contraintes naturelles** : pressions naturellement présentes dans la roche. Elles sont notamment occasionnées par le poids de la roche.

**Cavité souterraine** : Au sens de ce PPRN, ce terme désigne toutes les cavités situées au-dessous de la surface du sol, que l'origine soit naturelle (dissolution karstique de la roche) ou humaine, à l'exclusion des exploitations minières (combustibles, minerais, sels et terres rares).

**Contre-mine** : technique militaire consistant à creuser des galeries en avant de la place protégée afin de prévenir des attaques ennemies souterraines consistant à saper les fondations des fortifications.

**Descenderie** : accès à une carrière souterraine par un plan incliné creusé depuis la surface.

**Décompression de la roche** : Le fait de creuser la roche fait disparaître les contraintes naturelles de la roche autour de la cavité, ce qui occasionne un gonflement de la roche et son éclatement à terme.

**Diaclase** : cassure de terrain sans déplacement relatif.

**Enjeux** : personnes, biens, activités, moyens, infrastructures, patrimoine... susceptibles d'être affectés par un phénomène naturel. Les enjeux s'apprécient aussi bien pour le présent que pour le futur. Les biens et les activités peuvent être évalués financièrement, les personnes exposées dénombrées, sans préjuger toutefois de leur capacité à résister à la manifestation du phénomène pour l'aléa retenu. Dans le cadre des PPRN, l'appréciation des enjeux restera qualitative.

**Foisonnement** : capacité d'un sol ou d'une roche à augmenter le volume lors du déplacement du matériau (exemple : un effondrement).

**Karstique** : les eaux d'infiltrations dissolvent le massif et forme des zones de dissolution (karst ou conduit karstique) qui peuvent être colmatées ultérieurement par les produits de la dissolution (argiles).



## ***VII. Annexe - Fiches diagnostics de cavité***

Pour les données géométriques, en l'absence de points de surface, les épaisseurs de recouvrement sont calculées selon les données du modèle numérique de terrain (MNT) RGEAlt au pas de 1 m de l'IGN. Celui-ci est lissé selon une maille de 10 m afin de tenir compte des imperfections du MNT. Pour les cavités sur plan d'archives, la cote du terrain naturel (TN) la plus proche est utilisée pour calculer le différentiel avec l'altimétrie actuelle et ainsi reporter les profondeurs.



**ALP'GEORISQUES** - Z.I. - 52, rue du Moirond - Bâtiment Magbel - 38420 DOMENE - FRANCE  
Tél. : 04-76-77-92-00 Fax : 04-76-77-55-90  
sarl au capital de 18 300 €  
Siret : 380 934 216 00025 - Code A.P.E. 7112B  
N° TVA Intracommunautaire : FR 70 380 934 216  
Email : [contact@alpgeorisques.com](mailto:contact@alpgeorisques.com)  
Site Internet : <http://www.alpgeorisques.com/>